HAL
open science

Conception, Mécatronique et Contrôle des Plateformes dédiées aux Applications Centrées Humain

Hichem Arioui

To cite this version:

Hichem Arioui. Conception, Mécatronique et Contrôle des Plateformes dédiées aux Applications Centrées Humain. Automatique / Robotique. Université d'Evry-Val d'Essonne, 2010. tel-00621269

HAL Id: tel-00621269

https://theses.hal.science/tel-00621269

Submitted on 9 Sep 2011

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.

Université d'Evry Val d'Essonne
Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes
(IBISC)

Mémoire

présenté en vue d'obtenir le diplôme d'
Habilitation à Diriger des Recherches

par

Hichem ARIOUI

Spécialité « Robotique »

Conception, Mécatronique et Contrôle des Plateformes dédiées aux Applications Centrées Humain

Soutenue le XX Décembre 2010 devant le jury composé de :

M.	Antoine Ferreira	Professeur des Universités, ENSI de Bourges	Rapporteur
M.	Thierry-Marie Guerra	Professeur des Universités, Valenciennes	Rapporteur
M.	Kamal Youcef-Toumi	Professeur au MIT, Cambridge USA,	Rapporteur
M.	Mohammed M'Saad	Professeur des Universités, ENSI de Caen	Examinateur
M.	Alain Pruski	Professeur des Universités, Metz	Examinateur
M.	Saïd Mammar	Professeur des Universités, Evry	Directeur

A mes parents,
A ma femme,
A Habiba, Amir, Amine ... mes enfants,
A mes frères et sœurs.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus vifs remerciements à Saïd Mammar, Professeur à l'Université d'Evry, pour m'avoir encadré durant ma thèse et me confier des responsabilités en recherche et en enseignement. Ses qualités scientifiques et humaines, la disponibilité et la confiance dont il a fait preuve à mon égard m'ont donné une immense assurance. Je tiens de lui beaucoup de choses, qu'il soit assuré de ma sincère et totale gratitude.

Je remercie également Abderrahmane Kheddar, Co-Directeur du JRL à Tsukuba au Japon. Premièrement pour m'avoir fait confiance tout au long de ma thèse et pour le suivi de toute ma carrière scientifique. Ensuite pour ses nombreux conseils qui m'ont beaucoup aidé et m'ont orienté vers une recherche de qualité. Je lui suis extrêmement reconnaissant.

Je remercie tous les membres de mon jury pour leurs participation à ce jury.

Le travail d'un enseignant chercheur demande énormement d'investissement, nécessitant beaucoup de patience de la part de ses proches. Je remercie Amel (ma femme) et mes enfants pour avoir été patients lorsqu'il le fallait et m'avoir toujours encouragé.

L'aboutissement de ce travail fera, sans doute, encore une fois plaisir à mon père, Mohammed, et aux membres de ma famille, je leur dédie cette modeste contribution.

Evry, le 15 octobre 2010.

Table des matières

Table des matières vi

Liste des figures xii

Préface 1

1 Curriculum Vitæ 3
1.1 Etat civil . . . 3
1.2 Fonctions . . . 3
1.3 Formation . . . 4
1.4 Domaine de recherche . . . 4
1.5 Publications scientifiques . . . 4
1.6 Encadrements . . . 5
1.7 Responsabilités pédagogiques . . . 5
1.8 Responsabilités administratives . . . 5

2 Abréviations et Terminologies 7
2.1 Organismes d'enseignement et de recherche . . . 8
2.2 Terminologie haptique, véhicule et simulation de conduite . . . 9
2.3 Projets de recherches et autres terminologies . . . 9

3 Synthèse des activités de recherche 11
3.1 Synthèse des thèmes de recherche et principales contributions scientifiques . . . 13
3.2 Automatique du rendu haptique en présence de retard de communication . . . 13
3.2.1 Interfaçage haptique . . . 13
3.2.2 Stabilisation du rendu haptique en présence de retard de transmission . . . 14
3.2.3 Travaux de recherches en cours . . . 15
3.3 Simulateurs de conduite pour l'étude du comportement humain . . . 18
3.3.1 Travaux de recherches en cours : de la conception jusqu'à la commande . 19
3.3.1.1 Conception et réalisation de plates-formes à faible coût . . . 19
3.3.1.2 Modélisation et commande des simulateurs de conduite . 19
3.3.1.3 Modélisation dynamique des véhicules terrestres . . . 21
3.3.1.4 Plates-formes de restitution de mouvements réalisées . . . 21
3.3.2 Vers un simulateur de fauteuil roulant . . . 22
3.4 Véhicules deux roues : Aspects de modélisation et sécurité préventive 23
3.5 Résumé des principales contributions scientifiques . . . 24

3.6 Animations d'équipes et coopérations scientifiques 26
3.6.1 Animation d'équipes 26
3.6.2 Collaboration avec d'autres équipes de recherche 27
3.6.2.1 Relations nationales 27
3.6.2.2 Relations internationales 28
3.6.3 Projets et responsabilités 28
3.6.3.1 Projets en cours et financements 28
3.6.3.2 Projets terminés 29
3.6.3.3 Responsabilités et Représentations 29
3.7 Activités d'Encadrements 31
3.7.1 Encadrements de Post-Doctorants 31
3.7.1.1 Récapitulatif 32
3.7.2 Encadrements de thèses 33
3.7.2.1 Récapitulatif 37
3.7.3 Encadrements de Master2 et d'Ingénieurs 37
3.7.4 Autres encadrements 40
3.8 Séminaires, communications et autres manifestations 41
3.8.1 Séminaires 41
3.8.2 Organisation des manifestations 41
3.9 Rayonnement 42
3.9.1 Invitation et sélection 42
3.9.2 Jury de thèse 42
3.9.3 Activités de relecture 42

4 Liste des publications **45**
4.1 Liste des publications 47
4.1.1 Revues Internationales avec comité de sélection 47
4.1.2 Livres et chapitres de livre 47
4.1.3 Conférences internationales avec actes 48
4.1.4 Conférences nationales avec actes et séminaires 50
4.1.5 Rapports de recherche 50
4.1.6 Publications soumises ou en cours de révision 51

5 Synthèse des activités d'enseignement et des responsabilités pédagogiques et administratives **53**
5.1 Responsabilités pédagogiques et activités administratives 55
5.1.1 Représentations 55
5.1.2 Responsabilité des stages professionnels 55
5.1.3 Responsabilité des Emplois du Temps 56
5.1.4 Responsabilité du laboratoire d'électronique 56
5.1.5 Responsabilité de modules d'enseignement 56
5.1.6 Proposition et encadrement de stages 57
5.2 Activités d'enseignement 58
5.2.1 Responsabilité de modules 58
5.2.1.1 Université d'Evry, UFR Sciences et Technologies 58
5.2.1.2 Ecole supérieure d'InformaTique, réseaux et systèmes d'INformation 58
5.2.2 Modules enseignés à l'UFR ST de l'UEVE par année 58

5.2.3 Ecoles d'ingénieurs et autres universités 60

6 Contribution à la commande des dispositifs à retour haptique 63
6.1 Historique et état de l'art 65
6.1.1 La simulation haptique en réalité virtuelle 66
6.1.1.1 Les dispositifs à retour haptique 66
6.1.1.2 Applications des systèmes haptiques à base d'environnements virtuels 68
6.1.2 Commande des interactions à rendu haptique 69
6.1.2.1 Aspects de modélisation 69
6.1.2.2 Aspects de commande 72
6.2 Commande des systèmes téléopérés en présence de retard de transmission 77
6.2.1 Le retard de transmission variable, un problème plus complexe 78
6.3 Commande des dispositifs haptiques en présence de retard de transmission 79
6.3.1 Approche prédictive référencée modèle 80
6.3.1.1 Principaux résultats 80
6.3.1.2 Adéquation de la commande référencée modèle pour les interactions haptiques 84
6.3.1.3 Robustesse du schéma de commande 86
6.3.1.4 Résultats de simulation 86
6.3.1.5 Résultats d'expérimentation 89
6.3.2 Apports aux approches passives 92
6.4 Application : Téléopération d'un robot mobile pour l'assistance aux personnes âgées 93
6.4.1 Contexte et cadre du travail 94
6.4.2 Schéma de commande 94
6.4.3 Stratégie du rendu d'effort 95
6.4.4 Effet joystick 96
6.4.5 Résultats Expérimentaux 97
6.4.5.1 Analyses et Discussions 99
6.5 Application : Rendu haptique distribué 100
6.5.1 Problématique 100
6.5.2 Etat de l'art 101
6.5.3 Présentation de la plate-forme de simulation 102
6.5.4 Architecture de communication et gestion de ressources 103
6.5.4.1 Serveur Intelligent 103
6.5.5 Architecture Techniques basées sur le principe de l'enveloppe englobante 104
6.5.5.1 Gestion des ressources informatiques 104
6.5.5.2 Propriétés de l'enveloppe englobante 105
6.5.5.3 Description du fonctionnement avec l'enveloppe et présentation de cas typiques 106
6.5.5.4 Résultats de simulations : enveloppe de latence 107
6.6 Conclusion 109

7 Modélisation dynamique des véhicules à deux roues : Contributions et Applications 111

7.1 Introduction . . . 113
7.2 Mouvement de translation et de rotation . . . 114
7.3 Forces et moments . . . 115
7.3.1 L'interface roue-sol . . . 115
7.3.1.1 Force longitudinale . . . 116
7.3.1.2 Force latérale . . . 116
7.3.1.3 Moment de renversement . . . 117
7.3.1.4 Moment de résistance au roulement . . . 118
7.3.1.5 Moment d'auto-alignement . . . 119
7.3.1.6 Formule magique de Pacejka . . . 119
7.3.2 Forces aérodynamiques . . . 121
7.4 Dynamique des véhicules deux-roues . . . 121
7.4.1 Historique de la modélisation des deux roues . . . 121
7.4.2 Modèle dynamique de Sharp (71) . . . 125
7.4.2.1 Repères . . . 126
7.4.2.2 Angle de carrossage et de direction effective . . . 127
7.4.2.3 Angles de glissement latéral des pneumatiques . . . 129
7.4.3 Analyse de la dynamique d'un deux-roues . . . 130
7.4.4 Modifications apportées au modèle de Sharp 71 . . . 133
7.5 Développement de modèle dynamique pour les applications temps-réel : Technique de Newton-Euler récursive . . . 134
7.5.1 Géométrie du véhicule deux roues . . . 134
7.5.2 Dynamique des véhicules deux roues . . . 135
7.5.3 Résultats de simulations . . . 137
7.5.4 Discussion . . . 141
7.6 Sécurité préventive pour les conducteurs des véhicules deux roues . 141
7.6.1 Synthèse de travaux de recherches sur les deux roues motorisés . . . 142
7.6.1.1 Le motard et le statut d'usager vulnérable . . . 142
7.6.1.2 L'infrastructure routière . . . 143
7.6.1.3 Dynamique de la moto et le comportement du pilote . . . 143
7.6.1.4 L'équipement de protection . . . 144
7.6.2 Architecture du système d'alertes pour les véhicules deux roues . . . 144
7.6.3 Analyse de la perte de contrôle d'un véhicule deux roues lors de la prise de virage . . . 145
7.6.3.1 Angle de roulis désiré : modèles existants . . . 145
7.6.3.2 Modèle pour la génération du roulis admissible . . . 146
7.6.3.3 Analyse de l'impact des trois paramètres . . . 149
7.6.3.4 Modèles de la vitesse limite en prise de virage . . . 152
7.6.3.5 Résultats de simulations . . . 156
7.7 Conclusion . . . 157

8 Simulateurs et Simulation de Conduite : Contributions et Réalisations 159
8.1 Introduction . . . 161
8.2 Architectures des plates-formes de restitution de mouvement . . . 163
8.2.1 Eléments constituant un simulateur de conduite . . . 163
8.2.2 Cabine ou cockpit . . . 164

8.2.3 Système visuel 164
8.2.3.1 Système sonore 165
8.2.3.2 Trafic et scénario 165
8.2.3.3 Dynamique du véhicule virtuel 165
8.2.3.4 Restitution du mouvement 165
8.2.3.5 Géométrie, cinématique et commande bas-niveau 166
8.2.3.6 Plate-forme mécanique et système d'actionnement 166
8.2.3.7 Communication, acquisition et contraintes temps-réels . . 167
8.2.4 Classification d'architectures robotiques des simulateurs de conduite . . . 167
8.2.4.1 Plates-formes à base fixe 168
8.2.4.2 Plates-formes à structure série 168
8.2.4.3 Plates-formes à structure parallèle 169
8.2.4.4 Plates-formes à structure hybride 170
8.2.4.5 Simulateurs Low-Cost 171
8.3 Première partie : Simulateur de conduite SIM^2 pour la conduite automobile 171
8.3.1 Architecture des mini-simulateurs 172
8.3.2 Modèle dynamique de la plate-forme dite "longi" 174
8.3.2.1 Equation du mouvement longitudinal 174
8.3.2.2 Equation de mouvement siège 176
8.3.3 Modèle dynamique de la plate-forme dite "Lacet" 177
8.3.3.1 Description de la plate-forme Lacet 178
8.3.3.2 Modélisation de la plate-forme 179
8.3.4 Algorithmes de Restitution de Mouvements, "ARM" 181
8.3.4.1 ARM : Description générale et transcription sur le simulateur SIM^2 182
8.3.4.2 Algorithme classique 183
8.3.4.3 Contribution au réglage des paramètres des filtres classiques 185
8.3.4.4 Discussion sur les ARM et implémentation sur le simulateur SIM^2 187
8.3.5 Résultats pratiques et Expérimentations 188
8.3.5.1 Optimisation des mouvements linéaires sur le simulateur SIM^2 en condition normale de trafic 188
8.3.5.2 Tests de validation de la plate-forme Lacet 190
8.4 Deuxième partie : Simulateur de conduite deux roues 192
8.4.1 Aspects de conception et de mécanique 195
8.4.2 Aspects de modélisation et identification 197
8.4.2.1 Modèle géométrique inverse 197
8.4.2.2 Cinématique inverse de la plate-forme 199
8.4.2.3 Matrice jacobienne inverse 200
8.4.2.4 Modélisation dynamique de la plate-forme 200
8.4.2.5 Identification 203
8.4.3 Adaptation des ARM aux simulateurs deux-roues 205
8.4.4 Tests expérimentaux en boucle ouverte 206
8.4.4.1 Conduite en ligne droite 206
8.4.5 Changement de voie et prise de virage 207
8.4.6 Discussion 209

8.5 Conclusions 210

Conclusion générale **213**

A Modèle dynamique linéaire d'un véhicule deux roues **215**

Bibliographie **217**

Notations **235**

Liste des figures

3.1 Interconnexion des éléments constituant une simulation haptique. 14
3.2 Organigramme de la plate-forme de simulation. 16
3.3 SIM^2 et le Simulateur "Lacet" : deux simulateurs de conduite à 2 degrés de liberté munis de retours d'effort sur guidon 21
3.4 Simulateur de conduite deux roues à 5 degrés de liberté 22
3.5 Chronologie des projets. 30

5.1 Pourcentage des enseignements donnés par niveau et par type. 59

6.1 Architecture simpliste d'un rendu haptique en réalité virtuelle. 67
6.2 Deux types de stylo PHANToM de SensAble Technologies. 68
6.3 Similitudes entre couplage bilatéral en téléopération et commande des dispositifs à rendu haptique en réalité virtuelle [1]. 71
6.4 Dispositif haptique à un degré de liberté [2]. 72
6.5 Principe du retour d'effort classique. 73
6.6 Principe du couplage virtuel 74
6.7 Implémentation et intégration d'un couplage virtuel dans un schéma de contrôle pour le retour haptique. 75
6.8 Implémentation d'un correcteur type prédicteur de Smith 78
6.9 Principe de prédiction de Smith 80
6.10 Système bouclé à deux entrées avec retards 80
6.11 Schéma de la commande stabilisante 81
6.12 Schéma équivalent après correction 82
6.13 Schéma équivalent après correction : cas d'un retard τ_1 constant 83
6.14 Prédicteur de Smith placé du côté de l'EV contrairement aux systèmes de TOP 84
6.15 Implémentation pratique et avantageuse du correcteur présenté dans la figure 6.14 86
6.16 Simulation d'un comportement stable d'une interaction haptique en présence d'un retard constant 87
6.17 Simulation d'un comportement stable d'une interaction haptique en présence d'un retard variable 88
6.18 Corrélation entre les comportements du retour de force et le temps de retard $\tau_1(t)$ 89
6.19 Interaction haptique instable en présence d'un retard constant de 100 *msec* 90
6.20 Interaction haptique stable en présence d'un retard constant de $\tau_1 = \tau_2 =$ 100 *msec* 91
6.21 Interaction haptique à temps de retard variable via Berlin 92

6.22 Schéma simpliste de la mise en œuvre. 94
6.23 Configuration des vitesses et implémentations des capteurs ultrasons . . . 95
6.24 Seuils de distances entre le robot mobile et un obstacle. 96
6.25 Robot LINA 96
6.26 Situations classiques rencontrées au sein d'un environnement d'intérieur. . 97
6.27 Robot Mobile face à un mur $\tau_i = 0$: (a) Rendu de forces, (b) Déplacements du dispositif and (c) Vitesses linéaire et angulaire du Robot Mobile 98
6.28 Robot Mobile approchant un mur avec un retard de $\tau_i = 100ms$ 98
6.29 Robot Mobile se faufilant entre deux obstacles sous un retard de $\tau_i = 200msec$: (a) Rendu de forces, (b) Déplacements du disposotif and (c) Vitesses linéaire et angulaire du Robot Mobile 99
6.30 Organigramme de la plate-forme de simulation. 102
6.31 Environnement de la plate-forme de simulation. 104
6.32 L'architecture Client/Serveur mixte. 105
6.33 Un client et un objet statique dans une même scène virtuelle sans contact. . 106
6.34 Un client et un objet statique en collision contact. 107
6.35 Objet dynamique, avec et sans contact. 107
6.36 Simulation d'une interaction haptique avec retard constant sans et avec le module "enveloppe de latence", K = 30. 108
6.37 Simulation d'une interaction haptique avec retard constant avec le module "enveloppe de latence", K=50. 108
6.38 Simulation d'une interaction haptique dans le cas d'un retard variable sans et avec le module "enveloppe de latence" , K = 30 109

7.1 6 DDL d'un véhicule deux-roues 114
7.2 Représentation des forces et moments appliqués au pneu par la chaussée . 115
7.3 Force du glissement latéral : (à gauche) cisaillement de la surface de contact, (à droite) ballant du pneumatique 117
7.4 Moment de renversement 118
7.5 Moment d'auto-alignement : t_g est la chasse géométrique et t est la chasse pneumatique 119
7.6 Tracé de la formule magique de Pacejka 120
7.7 Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp94 122
7.8 Modes "*In-plane*" et "*Out-of-plane*" 123
7.9 Géométrie du véhicule deux-roues adoptée pour le modèle Sharp 2001 . . 124
7.10 Degrés de liberté du modèle FastBike 125
7.11 Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp 71 126
7.12 Angle de carrossage γ_f et $\gamma_f - \varphi$ en fonction de l'angle du guidon δ et de diverses valeurs de φ 128
7.13 Angle de direction effective δ_t et $\delta_t - \delta$ en fonction de l'angle du guidon δ et de différentes valeurs de φ. 128
7.14 Géométrie de l'interface pneu-sol pour les roues avant et arrière 129
7.15 Amortissement et fréquences des différents modes de la dynamique d'un deux-roues (Sharp 71) 130
7.16 Gains Statiques des fonctions de transfert $G_{\tau\to v}$, $G_{\tau\to\psi}$, $G_{\tau\to\varphi}$, $G_{\tau\to\delta}$ en fonction de la vitesse longitudinale 130

7.17 Réponse indicielle des fonctions de transfert $G_{\tau\to\varphi}$, $G_{\tau\to\delta}$, $G_{\tau\to\dot{\psi}}$ et $G_{\tau\to v}$ pour un couple échelon de $10N.m$ . . . 131
7.18 Corps et degrés de liberté considérés du véhicule deux roues . . . 135
7.19 Système multi-corps à chaîne ouverte . . . 136
7.20 Force longitudinale F_x vs κ pour des forces verticales $F_z = 1, 2, 3\ kN$ . . . 138
7.21 Force latérale F_y vs κ pour $\beta = 5°, 0°, -5°, -10°$ . . . 138
7.22 Moment d'auto-alignement M_z vs κ pour $\alpha_r = 0°, -2°, -5°, -10°$ . . . 139
7.23 Vitesse de référence / Vitesse du modèle moto . . . 140
7.24 Comparaison entre la consigne et le régime moteur délivré . . . 140
7.25 Forces longitudinales appliquées aux pneus avant et arrière . . . 141
7.26 Paramètres géométriques et forces considérées pour le modèle simplifié . . . 146
7.27 L'ellipse d'adhérence [3] . . . 147
7.28 Impact de l'angle de dévers sur le profil du roulis admissible en virage . . . 150
7.29 Impact de l'angle de pente sur le profil du roulis admissible en virage . . . 150
7.30 Impact de l'adhérence mobilisable . . . 151
7.31 Impact du transfert de charge . . . 151
7.32 Paramètres cinématiques d'un objet en mouvement circulaire . . . 152
7.33 Différents angles : pente, dévers et roulis . . . 154
7.34 Trajectoire du véhicule et ses caractéristiques . . . 156
7.35 Profils des vitesses limites . . . 157

8.1 Simulateur de Toyota - Centre Technique de Toyota à Susono City, Japon . 162
8.2 Architecture simplifiée d'un simulateur de conduite . . . 163
8.3 Mode immersif (a) Casque HMD (b) Représentation d'une partie du conducteur . . . 164
8.4 Simulateurs à base fixe : (a) Simulateur Volvo - Suède [4] (b) Simulateur à base fixe de l'INRETS Arcueil - France [5] . . . 168
8.5 Simulateur à structure série de VTI - Suède . . . 169
8.6 Plate-forme parallèle 6DDL type Gough-Stewart (Image Wikipédia) . . . 169
8.7 Simulateurs à structure parallèle : (a) Simulateur à plate-forme parallèle de l'université de Chalmers - Suède, (b) Simulateur dynamique de Renault - France . . . 170
8.8 Simulateurs à structure hybride : (a) Architecture hybride du simulateur ULTIMATE de Renault - France, (b) Simulateur NADS - Iowa, USA . . . 171
8.9 Architecture logicielle du mini-simulateur . . . 172
8.10 SIM^2 Plate-forme mobile à deux degrés de liberté . . . 173
8.11 Plate-forme Lacet à deux degrés de liberté . . . 174
8.12 Paramètres et Repère de la plate forme mobile/siège . . . 177
8.13 Architecture du simulateur lacet. . . . 178
8.14 Les corps et les repères de la plate-forme . . . 180
8.15 Algorithme classique . . . 184
8.16 Domaines des paramètres acceptables pour ω_n et ζ. L =0.6m, v_s = 0.048 m/s et a_s = 0.03m/s^2 utilisant un actionnement via un moteur Parvex NX620EAR 186
8.17 Comparaison des performances des divers algorithmes de restitution de mouvement sur le simulateur SIM^2 . . . 188
8.18 a- Angle du volant, b- Angle du lacet du véhicule virtuel et c- Rapport de la boîte de vitesse durant la conduite . . . 191

8.19 a- Position longitudinale de la plate-forme et b- Angle du lacet de la plate-forme . . . 192
8.20 (a) Simulateur de Honda : Prototype 1 et (b) Simulateur de Honda : Prototype 2 . . . 193
8.21 Le simulateur Honda Riding Trainer . . . 194
8.22 Simulateur MORIS du laboratoire Percro - Italie . . . 194
8.23 Modèle CAO de la plate-forme mécanique du simulateur deux-roues . . . 196
8.24 Le système à double retour d'effort du guidon . . . 196
8.25 Description cinématique de la plate-forme . . . 198
8.26 Tracés de Bode des fonctions de transfert . . . 205
8.27 1 : ouverture gaz ($\times$ 10%), 2 : accélération longitudinale (m/s^2), 3 : régime moteur ($\times$ 1000rpm), 4 : vitesse longitudinale (m/s), 5 : rapport boite de vitesse, 6 : angle de tangage (°) . . . 206
8.28 (a) Elongation vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ et angle de tangage simulateur θ_s, (b) Accélération longitudinale réelle et accélération restituée . . . 207
8.29 Changement de voie : (a) Angle de roulis désiré et simulé par le modèle virtuel de la moto, (b) Elongation des vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, position de la glissière ρ_3 et angle de roulis du simulateur φ_s . . . 207
8.30 Changement de voie : accélération latérale réelle et accélération restituée . 208
8.31 Prise de virage : (a) Angle de roulis désiré et simulé par le modèle virtuel de la moto, (b) Elongation vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, position de la glissière ρ_3 et angle du roulis simulateur φ_s . . . 208
8.32 Prise de virage : accélération latérale réelle et accélération restituée . . . 209
8.33 La première version du simulateur . . . 210

Avant propos

Ce mémoire constitue une synthèse de mes sept années d'exercice en tant que maître de conférences à l'Université d'Evry Val d'Essonne (UEVE) depuis spetembre 2003. Il retrace mes activités de recherche, avec le souci constant de maintenir un lien et une cohérence avec mon activité d'enseignement.

Durant ma thèse, effectuée au Laboratoire des Systèmes Complexes (LSC) d'Evry, mes travaux de recherche ont porté sur le développement de techniques de commande pour stabiliser le rendu haptique dans les applications de réalité virtuelle en interaction avec un utilisateur distant. En d'autres termes, exploiter les avancées de l'automatique moderne afin d'améliorer et d'étendre l'application des systèmes de réalité virtuelle à retour haptique dans le cadre d'un travail collaboratif à distance induisant par conséquent des retards de transmission. L'objectif de la thèse a été atteint en donnant plusieurs réponses à cette problématique ancienne et complexe, qui est la stabilisation de systèmes de téléopération en présence de retard. Les approches développées, prédictives et passives, du point de vue de l'automatique, offrent à n'importe quel opérateur la possibilité d'effectuer des tâches de manière naturelle et intuitive. L'intérêt majeur de ces approches qui améliorent les commandes bilatérales classiques, est la simplicité d'application et la non nécessité d'estimer le retard de communication, qu'il soit constant ou variable.

Ces recherches m'ont permis de me rendre compte que l'exploitation des techniques de réalité virtuelle dans le domaine de la téléopération, ou plus généralement dans celui du travail collaboratif ou du contrôle de machines complexes, offrait d'innombrables opportunités de développement. Ces applications, centrées sur l'utilisateur, nécessitent néanmoins la maîtrise et la mise en œuvre d'un dispositif mécatronique capable de satisfaire non seulement les contraintes fonctionnelles dictées par l'application, mais aussi les aspects sensoriels et technologiques nécessaires pour garantir une synergie homme-système la plus optimale possible. Par conséquent, la conception et la mise en œuvre de n'importe quelle architecture mécatronique pour la simulation assistée par les techniques de réalité virtuelle m'ont paru désormais s'inscrire dans un domaine plus vaste qui est celui des *applications centrées humain*.

Mes activités de recherche ont ainsi été orientées dans ce sens. Il est à noter que cette problématique pluridisciplinaire nécessite bon nombre de compétences qu'un seul chercheur n'est certainement pas capable de maîtriser et apporter seul de réelles contributions. Raison pour laquelle je me suis focalisé, dans un premier temps, sur les aspects de développement, de mécatronique et de commande des plateformes de rendu de mouvements/efforts dédiées au "simulateur de conduite".

Les objectifs de telles plateformes sont nombreux et prétendent répondre à diverses problématiques d'ordre sociétal (handicap et accessibilité), sécurité routière (apprentissage de la conduite) ou même économique (test de nouveaux prototypes de véhicules de tourisme et des deux roues). Ce but, qui nécessite de nouvelles recherches de modélisation et de contrôle (particulièrement sur les motocycles, domaine en vogue), peut sem-

bler quelque peu ambitieux et je ne prétends pas répondre à toutes les problématiques connexes. Ce mémoire apporte néanmoins une contribution sur des points particuliers et ouvre des perspectives de recherches que j'ambitionne de poursuivre dans la continuité de ce travail.

Sur le plan de l'enseignement, mes activités ont commencé durant ma thèse en tant que vacataire à l'UEVE et dans des écoles d'ingénieurs. Depuis ma nomination à l'UEVE, elles se sont étendues et couvrent aujourd'hui l'ensemble des matières de l'EEA. A cette pluridisciplinarité, s'ajoutent la responsabilité de modules d'enseignement, la coordination de projets et la rédaction de supports de cours. Je suis ainsi responsable de plusieurs modules d'enseignement dans différents niveaux. Ces modules représentent un volume horaire important que je répartis entre plusieurs collaborateurs enseignants et moi-même.

Ma fonction d'enseignant m'a également amené à assumer différentes charges administratives au sein de l'UEVE. Je suis ainsi membre du conseil scientifique de l'Université et j'ai occupé plusieurs autres reponsabilités au sein de l'UFR Sciences et Technologies d'Evry.

Curriculum Vitæ 1

1.1 Etat civil

Prénom et Nom	Hichem ARIOUI
Date et lieu de naissance	10 Février 1976 à Annaba, Algérie
Situation familiale	Marié, 03 enfants
Adresse personnelle	22, rue de l'Orge, 91000, Evry Tél. : +33680316342
Adresse professionnelle	Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes IBISC - EA 4526 Université d'Evry Val d'Essonne (UEVE) 40, rue du Pelvoux, CE1455, Courcouronnes 91020, Evry Cedex, France Tél. : +33169477564 Fax : +33169477599 Courriel : hichem.arioui@ibisc.fr

1.2 Fonctions

Depuis Sept. 03	Maître de conférences - section 61 du CNU UFR Sciences et Technologies à UEVE
Sept. 06 - Août 09	Intervenant Vacataire, ITIN à Cergy
Sept. 02 - Août 03	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche UFR Sciences et Technologies à UEVE
Sept. 99 - Août 02	Intervenant Vacataire UFR Sciences et Technologies à UEVE
Sept. 01 - Août 02	Intervenant Vacataire, EFREI à Vitry sur Seine
Sept. 00 - Août 01	Intervenant Vacataire, ESIGETEL à Fontainebleau
Sept. 99 - Août 02	Intervenant Vacataire UFR Sciences et Technologies à UEVE

1.3 Formation

06 Déc. 02 Doctorat de l'Université d'Evry Val d'Essonne
Sujet : Commande de dispositifs haptiques en présence de retard de transmission
Directeur de thèse : Florent Chavand, Professeur à l'IIE d'Evry
Mention : Très honorable
Jury :

M. J-G. Fontaine	Professeur au LVR, Bourges	Président
M. P-A. Bliman	Chargé de Recherche à l'INRIA Roquencourt	Rapporteur
M. Ph. Coiffet	Directeur de Recherche, CNRS	Rapporteur
M. K. Youcef-Toumi	Professeur au MIT, Cambridge, USA	Rapporteur
M. J-F. Maniere	Techno-Centre Renault, Paris	Examinateur
M. F. Chavand	Professeur à l'IIE d'Evry	Examinateur
M. S. Mammar	Professeur à l'UEVE	Examinateur
M. A. Kheddar	Maître de conférences à l'UEVE	Examinateur

05 Juil. 99 Diplôme d'Etudes Approfondies de Robotique, Paris 6 - INSTN - ENSAM
Option : Robotique d'Intervention et de Service (RIS)

29 Juin 98 Ingénieur en Electronique, Institut d'Electronique d'Annaba, Algérie
Option : Automatique
Mention : Assez Bien

1.4 Domaine de recherche

1. Retour haptique basé sur les techniques de réalité virtuelle
   - Commande des dispositifs à retour haptique en interaction avec un environnement virtuel en présence de retard de transmission.
   - Rendu haptique pour la mise en place de commandes d'assistance à la conduite.
2. Simulateurs et simualtion de conduite
   - Conception, modélisation et mécatronique de simulateur de conduite pour l'étude de comportement humain (véhicule et motocycle).
   - Commande des plateformes à restitution de mouvements en interaction avec un environnement virtuel.
3. Véhicules terrestres
   - Modélisation des véhicules deux roues.
   - Développement de systèmes d'alertes (fonction de risque) pour la conduite.

1.5 Publications scientifiques

- 5 articles de revues.
- 1 chapitre de livre en français.
- 3 chapitres de livre en anglais, dont 1 en cours de publication.
- 1 édition d'actes de conférence
- 3 rapports de recherche.

- 1 article invité.
- 34 articles dans des congrès internationaux et nationaux avec comité de lecture et publication des actes.
- Plusieurs travaux soumis ou en révision.

1.6 Encadrements

- 2 post-doc de l'Université d'Evry Val d'Essonne, **2006-2008** et **2009-2010**.
- 2 thèses de doctorat de l'Université d'Evry Val d'Essonne, soutenues en **2005** et **2008**.
- 1 thèse de doctorat de l'Université d'Annaba (Algérie), soutenue en **2006**.
- 3 thèses de doctorat en cours (2 à l'UEVE et 1 à l'Université d'Orsay).
- 7 master de recherche de deux universités (UEVE, Paris12, LCPC).
- Plusieurs projets de master 1 (ex-Maîtrise) de l'UEVE.

1.7 Responsabilités pédagogiques

- Responsable des stages professionnels pour les étudiants en Maîtrise et en DESS entre **2003-2006** (UFR & ST de l'UEVE).
- Responsable des emplois du temps de l'UFR & ST entre **2006-2007**.
- Responsable de plusieurs modules :
  1. Filtrage pour les étudiants de Maîtrise GSI-CFA, **2007-2010**.
  2. Modélisation et Technologies (MT71) pour les étudiants de Maîtrise GSI, **2006-2009**.
  3. Asservissement pour les étudiants de Licence Professionnelle, **2006-2010**.
  4. Automatisme et Informatique pour les étudiants de Licence GM, **2006-2010**.
  5. Asservissement pour les apprentis de Maîtrise GSI-CFA, **2005-2010**.
  6. Signaux et Systèmes pour les étudiants de Licence GSI-CFA, **2007-2010**.

1.8 Responsabilités administratives

- Membre de la commission de spécialistes/sélection section 61-63 de l'UEVE entre **2004-2010**.
- Membre élu du Conseil Scientifique de l'UEVE, depuis **2007**.
- Membre de la commission de spécialistes section 61-63 de l'Université d'Orsay entre **2006-2008**.
- Responsable du groupe Simulation et Simulateurs de conduite au laboratoire IBISC.
- Membre de l'action spécifique CNRS " Interfaces et Informations Haptiques " dans le cadre du RTP 15 " Interfaces Médiatisées et Réalité Virtuelle ".
- Responsable de la Journée des Doctorants du laboratoire IBISC, **2004**.
- Président du comité de pilotage de la conférence internationale CISA.
- Initiateur et General Chair de la première édition de CISA'08.
- Membre du comité d'organisation de la conférence EuroHaptics **2006**.
- Membre du comité d'organisation des JJCR'14 en *2001*.

Abréviations et Terminologies 2

2.1 Organismes d'enseignement et de recherche

AIST	Agency of Industrial Science and technology (Japon)
ANR	Agence Nationale de Recherche
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CEMIF	Centre d'Etudes Mécaniques d'Ile de France
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNSR	Conseil National de Sécurité Routière
CNU	Conseil National des Universités
EFREI	Ecole Francaise d'Electronique et d'Informatique
ENSIE	Ecole Nationale Supérieure d'Informatique d'Entreprise
ESIGETEL	Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Informatique et Génie des Télécommunications
GDR	Groupe de Recherche
IBISC	Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes
IFP	Institut Français du Pétrole
IEF	Institut d'Electronique Fondamentale
IIE	Institut d'Informatique d'Entreprise
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
INSTN	Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires
ISIS	Information, Signal, Images et ViSion
ITIN	école supérieure d'InformaTique, réseaux et systèmes d'INformation
IUP	Institut Universitaire Professionalisé
IUT	Institut Universitaire de Technologie
LAGIS	Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal
LASA	Laboratoire d'Automatique et des Signaux d'Annaba
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEPSIS	Laboratoire d'Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations
LIVIC	Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
LVR	Laboratoire de Vision et Robotique
LSC	Laboratoire des Systèmes Complexes
L2S	Laboratoire Signaux et Systèmes
MACS	Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
TECSAN	Technologie pour la Santé
UEVE	Université d'Evry Val d'Essonne
UFRST	Unité de Formation de Recherche en Sciences et Technologies
UQC	University of Quebec at Chicoutimi

2.2 Terminologie haptique, véhicule et simulation de conduite

ABS	Anti lock Brake System
ARPH	Assistance Robotique aux Personnes Handicapées
DDL	Degrés De Liberté
ESP	Electronic Power Steering
EV	Environnement Virtuel
GPC	Commande Prédictive Généralisée
GPS	Global Positioning System
HMD	Head Mounted Display
RV	Réalité Virtuelle
TOP	TéléOPération
XML	eXtensible Markup Language

2.3 Projets de recherches et autres terminologies

ATER	Attachés Temporaire d'Enseignement et de Recherche
AS	Action Spécifique du CNRS
BQR	Bonus Qualité Recherche
CFA	Contrat de Formation par Apprentissage
CISA	Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation
CRCT	Congé de Recherche et Conversion de Thématique
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies
E-Motive	Assistances à la conduite pour les véhicules 2 roues motorisés
FC	Formation Continue
GEII	Génie Electrique et Informatique Industrielle
GM	Génie Mécanique
GSI	Génie des Systèmes Industriels
JJCR	Journées Jeunes Chercheurs en Robotique
PCRD	Programme (Européen) Cadre en Recherche et Développement
SiFaR	Similateur de Fauteuil Roulant
SIMACOM	SIMulateur pour l'Apprentissage de la COnduite de 2 roues Motorisés
SUMOTORI	SUreté MOTO RIsques
RIDER	Recherche sur les accidents Impliquant un DEux Roues motorisé
RTP	Réseau Thématique Pluridisciplinaire
RVSI	Réalité Virtuelle et Systèmes Complexes
VIGISIM	SIMulateur de détection des altérations du comportement liées à la VIgilance

Synthèse des activités de recherche 3

Sommaire

3.1 Synthèse des thèmes de recherche et principales contributions scientifiques . . . 13
3.2 Automatique du rendu haptique en présence de retard de communication . . . 13
3.2.1 Interfaçage haptique . . . 13
3.2.2 Stabilisation du rendu haptique en présence de retard de transmission . . . 14
3.2.3 Travaux de recherches en cours . . . 15
3.3 Simulateurs de conduite pour l'étude du comportement humain . . . 18
3.3.1 Travaux de recherches en cours : de la conception jusqu'à la commande . . . 19
3.3.2 Vers un simulateur de fauteuil roulant . . . 22
3.4 Véhicules deux roues : Aspects de modélisation et sécurité préventive 23
3.5 Résumé des principales contributions scientifiques . . . 24
3.6 Animations d'équipes et coopérations scientifiques . . . 26
3.6.1 Animation d'équipes . . . 26
3.6.2 Collaboration avec d'autres équipes de recherche . . . 27
3.6.3 Projets et responsabilités . . . 28
3.7 Activités d'Encadrements . . . 31
3.7.1 Encadrements de Post-Doctorants . . . 31
3.7.2 Encadrements de thèses . . . 33
3.7.3 Encadrements de Master2 et d'Ingénieurs . . . 37
3.7.4 Autres encadrements . . . 40
3.8 Séminaires, communications et autres manifestations . . . 41
3.8.1 Séminaires . . . 41
3.8.2 Organisation des manifestations . . . 41
3.9 Rayonnement . . . 42
3.9.1 Invitation et sélection . . . 42
3.9.2 Jury de thèse . . . 42
3.9.3 Activités de relecture . . . 42

3.1 Synthèse des thèmes de recherche et principales contributions scientifiques

Au cours de mes travaux de thèse, je me suis intéressé à la commande des dispositifs à retour haptique en interaction avec des environnements virtuels distants. Cette distance sous-entend un délai de transmission qui lui même est synonyme, généralement, d'instabilités de toute l'interaction haptique. Les stratégies de commande originales que j'ai proposées, afin de stabiliser le rendu haptique en présence de retard de transmission, font aujourd'hui encore référence dans le domaine des systèmes de téléopération [6], [7], [8]. L'application de ces approches avait donné lieu à des expérimentations consistant à naviguer au sein d'un environnement virtuel se trouvant, à chaque fois, soit en France, en Allemagne, en Grèce ou au Brésil [9].

A la suite de mon doctorat, des collaborations intéressantes avec l'INRETS et l'IEF m'ont permis d'aborder des problématiques sensiblement différentes. Si le thème de " la modélisation et la commande " est resté inchangé, le cadre a été élargi : il concerne à présent, d'une part, les problèmes de la conception jusqu'à la commande des simulateurs de conduite (véhicules à 4 ou 2 roues), utilisés pour l'étude et l'évaluation des comportements des usagers et, d'autre part, la mise en place de systèmes d'alerte pour la conduite sur les véhicules de deux roues. Les recherches entreprises sur les véhicules deux roues sont nouveaux et réputés difficiles. Je me suis fortement investi dans ce domaine nouveau et extrêmement porteur sur le plan scientifique. Aujourd'hui, mon activité de recherche peut être divisée en trois actions différentes qui sont exposées ci-après : automatique du rendu haptique en présence de retard de communication, simulation et simulateurs de conduite et la dernière action concerne la modélisation des motocycles et le développement de nouveaux systèmes d'alerte pour la sécurité préventive.

Depuis mon intégration au sein du LSC (maintenant IBISC), les activités liées aux aspects de modélisation et commande des simulateurs de conduite (véhicules à 4 ou 2 roues) constituent une part non-négligeable de mon activité et de celle du laboratoire.

3.2 Automatique du rendu haptique en présence de retard de communication

3.2.1 Interfaçage haptique

Les applications centrées humain, telles que les interactions haptiques, sont de plus en plus nombreuses et variées. Une variété qui nécessite parfois une mise en place et un contrôle complexes de part la nature des systèmes interconnectés (figure 3.1) :

- l'opérateur humain ;
- l'interface haptique ;
- l'environnement virtuel (EV) ;
- le canal de transmission.

Les applications haptiques mettent en interaction un opérateur humain avec un environnement virtuel. Cette interaction peut faire appel au sens de touché (rugosité), le sens kinesthésique (effort) ou le sens tactile (thermique) de l'humain. Donc, le fonctionnement perceptif haptique est associé à la fonction motrice chez l'humain et à des caractéristiques particulières qui distinguent ce sens du reste (vision, odorat, etc.)

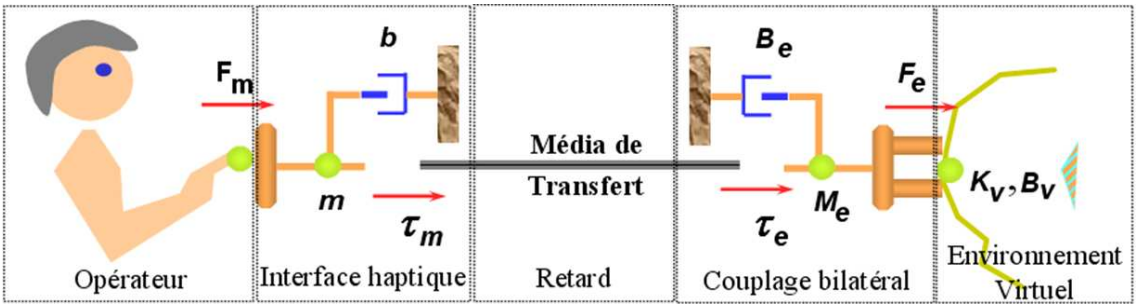

FIGURE 3.1 – *Interconnexion des éléments constituant une simulation haptique.*

Les applications du rendu haptique en réalité virtuelle concernent plusieurs domaines : simulateurs interactifs chirurgicaux, entrainement aux gestes délicats, simulateurs de pilotage et de conduite automobile, les jeux et divertissements, le prototypage virtuel multi-métiers, etc.

3.2.2 Stabilisation du rendu haptique en présence de retard de transmission

Le couplage entre les techniques de réalité virtuelle, à base d'environnements virtuels, et les systèmes de téléopération à retour d'effort ont permis la mise en place d'interaction à rendu haptique distribuée sur le réseau. Cette "distribution" sur les réseaux de communication tels que Internet, rend possible la réunion de plusieurs expertises sur une même maquette virtuelle et de ce fait la réalisation de tâches jusque là impossibles.

Par ailleurs, cette mise en place provoque de manière inévitable des retards de transmission relatifs au type de l'architecture de communication établie afin de connecter les divers sites "clients". Les problèmes provoqués par les latences de transmission dans les systèmes à retour d'effort et/ou haptique sont anciens et sont devenus dernièrement encore plus complexes avec l'apparition des nouvelles technologies de communication telles qu'Internet. Cette complexité provient des fluctuations dues aux congestions du réseau.

A ces problèmes d'instabilités, dans les systèmes de téléopération, causés par le retard, les chercheurs ont proposé deux types de solutions :

1 – logicielles basées sur le concept de la téléprogrammation. En effet, ce concept qui consiste à désactiver les commandes classiques basées sur le principe du "couplage bilatéral" direct entre le poste de téléopération et le site esclave [10]. Le couplage des deux sites est remplacé par deux boucles locales. Par ailleurs, la téléprogrammation souffrait d'un manque de fidélité du rendu d'effort et de la faible cohérence entre le visuel et ce que ressent l'opérateur.

2 – automatiques où les commandes classiques basées sur le principe de l'asservissement bilatéral, faisant appel à la théorie de la passivité, offrent des alternatives intéressantes mais restent handicapantes dans certains cas, telles que les fluctuations du retard de transmission et la faible transparence en présence d'un temps de retard important.

Pour répondre à ces problèmes, réputés difficiles, j'ai proposé deux approches pour stabiliser le rendu haptique. La première solution est une commande prédictive basée sur l'identification du modèle du dispositif haptique utilisé. La commande est une extension du prédicteur de *Smith* aux systèmes de téléopération avec deux avantages majeurs :

a) l'approche ne nécessite aucune information, à priori, sur la taille du retard ;

b) l'approche est extensible directement au cas du retard variable, ce qui n'est pas le cas pour les approches passives.

L'intérêt de cette nouvelle approche est de permettre, sur la seule connaissance du modèle de l'interface utilisée, une simulation haptique intuitive et transparente et ce quelles que soient les conditions d'expérimentation, notamment un temps de retard important. Une étude de robustesse a montré que la commande est valide même en présence d'erreurs d'estimation des paramètres du dispositif haptique. Pour chaque paramètre, un intervalle d'erreur est donné.

Ces travaux, reconnus par la communauté scientifique du domaine, ont été diffusés via plusieurs chapitres de livres, revues et publications dans des congrès internationaux [11], [7], [12]. L'objectif à long terme consiste à étendre ce schéma de commande pour les dispositifs haptiques à modèle non-linéaire, en se basant sur des considérations énergétiques (type contrôleur de passivité).

Par ailleurs, il est à noter que le prédicteur de *Smith* a été déjà envisagé pour le système de la téléopération mais abandonné par la suite puisque la prédiction concernait le site esclave du système, ce dernier étant généralement mal connu.

La deuxième solution que j'ai proposée concerne l'amélioration de l'approche basée sur le principe des variables d'onde pour laquelle j'ai étudié deux points essentiels. Le premier point est l'amélioration des performances du schéma de commande passif (variable d'ones) combiné avec le contrôleur prédictif (référencé modèle). Dans ce cas, la prédiction se fait dans le domaine des ondes. Le second point est l'extension des variables d'onde au cas de retard variable. Dans cette approche, une preuve est donnée sur la manière avec laquelle la passivité de tout le système est compromise. Un gain adaptatif est inséré, à la réception des données et explicitement lié à la taille du retard, afin de conserver la passivité du canal de transmission.

Les expérimentations que j'ai menées pour la validation des deux approches "prédictive et passive", en présence de retards de communication plus ou moins grand, se sont avérées très convaincantes et font toujours référence dans le domaine [7], [8]. Des sites clients, pour le transfert de données, ont été installés dans les universités de Berlin, Rio de Janeiro et Athènes. Fort de cette expérience, j'ai participé activement à plusieurs réseaux nationaux : AS CNRS "Interfaces et Informations Haptiques" et Européen : Réseau d'Excellence "INTUITION".

3.2.3 Travaux de recherches en cours

L'intérêt des chercheurs/indutriels porté aux applications et aux technologies de Réalité Virtuelle (RV) est grandissant, notamment pour le prototypage des maquettes virtuelles, les systèmes de simulation et les systèmes d'apprentissage et d'entraînement, le perfectionnement du geste, etc. Ces applications trouvent toute leur utilité dans le cadre d'un maquettage rapide permettant d'effectuer en ligne les premiers essais d'intégration, de montage/démontage et mettra l'opérateur en interaction directe avec une représentation virtuelle du produit durant sa phase de conception, donc avant sa phase de production. Un procédé semblable "*distribué via le réseau*" peut être imaginé et peut s'avérer très intéressant dans le cas où nous souhaitons rassembler plusieurs expertises distantes sur une même maquette virtuelle (médecine, ingénierie concourante, automobile, aérospatiale, etc.). Néanmoins, un certain niveau de "Qualité de Service (QoS)" doit être assuré

afin de garantir des interactions intuitives et transparentes. Quelques idées ont été abordées dans deux chapitres de livres que j'ai publiés récemment [11], [13].

Dans ce contexte, j'ai souhaité le développement d'une plate-forme logicielle complète (Figure 3.2), pour des interactions haptiques distribués via le réseau, afin d'améliorer les aspects de stabilité et de fidélité du rendu haptique. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage de Master (ex-DEA RVMSC) que nous avons publié par la suite, [14].

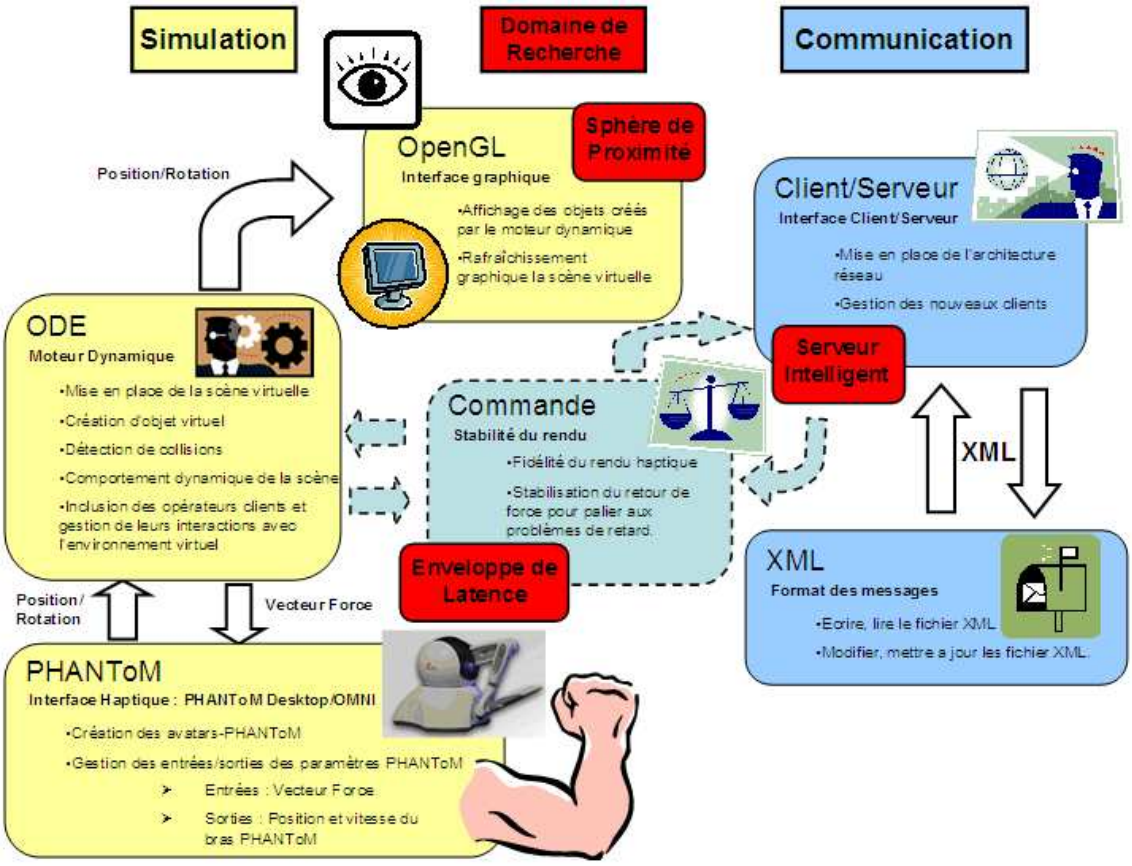

FIGURE 3.2 – *Organigramme de la plate-forme de simulation.*

Afin d'augmenter le déploiement d'applications haptiques collaboratives, un défi important est à relever et résumé par la question : Comment fournir une connexion appropriée entre les applications haptiques distribuées, intuitives et transparentes ? Les diverses données sensorielles (sonores, visuelles, tactiles, kinesthésiques, etc.) ainsi que les commandes doivent être envoyées de manière synchrone au travers du média de transfert (tel qu'Internet). Par contre, plusieurs problèmes surgissent avec l'utilisation de ce média car les protocoles de communication utilisés sont indéterministes. Même si ces protocoles sont les plus utilisés, ils ne sont pas conçus pour des applications temps-réel et par conséquent les transferts souffrent de retards, de pertes d'informations et de congestions de réseaux imprévisibles.

Nous avons déterminé plusieurs verrous à résoudre :

- Etude de la fidélité du rendu haptique (compromis entre stabilité et transparence) : l'objectif de cette action est de permettre une meilleure définition du retour haptique pour qu'il soit :
  - ◇ Significatif : avoir une cohérence entre les informations vues et ressenties ;

  - ◇ Utilisable : proposer des schémas de commande suffisamment stables, quelles que soient les informations sensorielles rendues. Une même scène peut en effet transmettre des informations visuelles, de température, de texture ou d'effort ayant des spécificités matérielles (hétérogénéité des interfaces) ou sensorielles (bandes passantes différentes). Ces points doivent être étudiés avec attention en cas de problèmes de congestion de réseau car les retours multi-sensoriels sont dans ce cas désynchronisés.
- Architecture logicielle de collaboration : l'objectif est d'étudier l'organisation logicielle des transferts de données et ainsi proposer des architectures de communication adaptées à la problématique ;
- Techniques de réalité virtuelle : dans une moindre mesure, dans le cadre d'actions collaboratives, les techniques de simulation et de détection et de traitement des collisions doivent peut-être repensées et adaptées (complexité des méthodes, réalisme de la scène, nombre d'utilisateurs, etc.)

Les idées exposées ci-dessus peuvent trouver preneur et amorcées une excellente collaboration dans notre laboratoire en faisant appel aux compétences du groupe de recherche "Télétravail Collaboratif", animé par Samir Otmane. L'objectif à long terme est, d'une part, de proposer de nouveaux formalismes et outils logiciels pour répondre aux différentes exigences d'une architecture à rendu haptique distribué, d'autre part, d'approfondir les idées s'articulant sur des stratégies dites d'*enveloppes englobantes* proposées pour la prédiction de la collision et l'anticipation sur le retard, [14]. Par ailleurs, lidée des *serveurs intelligents* est proposée afin de gérer au mieux les ressources disponibles chez les opérateurs clients [11].

Fort de cette expérience dans la commande des dispositifs haptiques en présence de retard, je me suis intéressé, en collaboration avec Philippe Hoppenot (laboratoire IBISC) dans le cadre du Projet Européen CompanionAble (Integrated Cognitive Assistive and Domotic Companion Robotic Systems for Ability and Security), à une nouvelle recherche visant à développer un support de stimulation cognitive et de gestion de la thérapie pour des personnes âgées atteintes de troubles cognitifs (maladie d'Alzheimer). Le support sera construit autour du robot mobile "ARPH" compagnon en relation avec un environnement de type habitat intelligent. Dans le cadre de ce projet, nous voulons donner à l'opérateur distant (personnel soignant ou de télévigilance) un moyen d'interaction avec la personne à domicile sous la forme d'une commande à distance du robot mobile semi-autonome via un dispositif haptique ou joystick à retour d'effort.

Une première phase, confiée à Zheng Dai, post-doctorant, consistait en la mise en place d'une architecture de simulation haptique afin de commander au mieux le robot mobile distant. La difficulté de cette expérimentation réside dans le fait qu'il y ait deux types de retards, le premier est celui de la communication qui peut s'avérer grand et fluctuant et le deuxième est lié aux temps de traitement de l'information au niveau des capteurs ultrasons, généralement constant.

La deuxième phase revient à mettre en place une nouvelle technique de commande palliant ces difficultés dues aux différents retards pour permettre une coopération homme-machine de façon intuitive. Cette tâche a été confiée à Lounis Temzi (stage de Master 2, RVSI).

Les premiers résultats ont été soumis à publication dans [15]. Les premières conclusions subjectives sont basées sur le retour des sujets ayant expérimentés le système de

téléopération [16]. Pour ces utilisateurs, le rendu visuel ne pourra se substituer au rendu haptique que dans certains cas "simples" (voir chapitre 6, section 6.4). D'autres critères objectifs ont été élaborés tels que : le temps d'exécution de la tache, facilité du contrôle, etc.

3.3 Simulateurs de conduite pour l'étude du comportement humain

Cette thématique de recherche a pour cadre une collaboration très étroite entre trois centres de recherche : l'INRETS, l'IEF et le laboratoire IBISC. L'objectif initial était la mise en œuvre de systèmes d'aide à la conduite sur simulateurs de conduite à base fixe. Ce système consistait en un volant actionné afin de servir comme un dispositif haptique rendant une information, entre autres, sur la nature du contact pneu-chaussée. Cet axe de recherche a été amorcé par Abderrahmane Kheddar (IBISC) en collaboration avec Stéphane Espié (MSIS-INRETS) dans le cadre de la thèse de Monsieur Hakim Mohellebi pour laquelle j'ai participé à plus tard l'encadrement scientifique.

Depuis 2003 et après le départ d'Abderrahmane Kheddar, j'ai pris la responsabilité de l'animation de cette thématique au sein du laboratoire. J'ai pu poursuivre les travaux en cours ainsi qu'élargir le spectre de nos activités en passant d'architectures à rendu d'effort à des architectures à rendu de mouvements (base mobile) pour des applications de simulation de conduite afin d'étudier les comportements des conducteurs. Cette deuxième catégorie est à mon sens plus globale et aussi pluridisciplinaire que les interactions haptiques. En effet, la simulation de conduite aborde à la fois des thèmes de recherche sur le système de perception chez l'homme et des thèmes de recherche sur la robotique de façon générale (conception, modélisation mécanique, contrôle/commande, sécurité routière, etc.).

La simulation de conduite consiste à donner l'illusion à un conducteur humain qu'il se déplace dans un environnement routier au volant d'un véhicule, l'environnement et le véhicule étant virtuels à l'exception des organes de contrôle / commande du véhicule. L'illusion de mouvement propre est un phénomène complexe qui met en jeu les capteurs proprioceptifs de l'être humain, notamment des systèmes visuel et vestibulaire, ainsi que les représentations (acquises) de la position et de l'équilibration du corps dans l'espace.

L'utilisation d'un simulateur de conduite apporte un certain nombre d'avantages indéniables : sécurité d'utilisation, conception de véhicule, comparaison des conducteurs, formation et sensibilisation des conducteurs aux manœuvres d'urgences, essais de différents milieux (urbain ou autoroutier), etc. Il constitue, de ce fait, un outil de recherche extraordinaire permettant de mener des recherches sur leur comportement au sein du trafic routier, est donc un enjeu majeur en termes de sécurité routière.

Dans cette nouvelle thématique, mes travaux ont porté sur les simulateurs de conduite (automobile ou motocycle) dans le cadre de deux projets Predit-ANR : SIMACOM et VIGISIM. Mes travaux ont porté, d'une part, sur la mise au point de trois prototypes de simulateurs dont un dédié pour les deux roues et les deux autres dédiés à l'automobile, et d'autre part, sur l'amélioration des rendus multimodaux pour une meilleure présence du conducteur, dans son monde virtuel de simulation, par l'application de techniques basées sur le retour d'effort, la restitution de mouvements (algorithmes de washout) et l'assistance à la conduite.

3.3.1 Travaux de recherches en cours : de la conception jusqu'à la commande

Si la conception de simulateurs automobiles est un champ de recherche très actif depuis de nombreuses années, la simulation de conduite " moto " reste balbutiante avec peu de prototypes dans le monde. La question de l'immersion est probablement encore plus complexe pour un deux roues que pour un quatre roues du fait notamment des questions d'équilibre. Plus concrètement, trois points caractérisent mes activités de recherche en cours :

3.3.1.1 Conception et réalisation de plates-formes à faible coût

Il est à noter que la complexité d'un simulateur de conduite ne reflète en aucun cas sa fidélité à restituer tous les mouvements. Pour cette raison, il était intéressant de proposer des solutions ciblées à base de plates-formes mobiles bas coût destinées principalement aux écoles de formation, établissements hospitaliers et autres utilisateurs. Le système doit donc être commercialisable et les solutions techniques doivent en tenir compte. Ces simulateurs "low cost" sont destinés pour des applications particulières, telles que l'étude du comportement humain dans des milieux urbains (situations accidentogènes, étude de la controllabilité/maniabilité, etc.). Par ailleurs, la simplicité de ces architectures mécaniques est compensée, généralement, par des artifices logiciels (sonore, visuels) ou matériels (vibrations, vent) afin d'arriver à un degré immersion comparable à celui des "super-simulateurs" existants.

Cette thématique de recherche concerne le développement d'architectures mécatroniques pour la simulation de conduite automobiles et motocycles. Elle aborde des aspects de conception et réalisation que nous pouvons synthétiser comme suit :

- Choix des ressentis pertinents et sélection des mouvements : première étape dans la caractérisation des simulateurs de conduite, lors de cette étape nous définissons, suivant l'application pour laquelle est dédiée cette plate-forme mécanique, les ressentis à privilégier et les mouvements, linéaires et/ou de rotation, permettant leur reproduction [17], [18]. Nos choix (ressentis et mouvements) se basent, d'une part, sur des travaux récents faisant la classification des mouvements et leurs caractérisations (vitesse, axe de rotation, débattements, etc.) , d'autre part, sur la base de discussions avec des conducteurs expérimentés. A la suite de cette étape vient la proposition de la cinématique de la plate-forme en répondant au cahier des charges défini précédemment [19], [20].
- Technologies d'actionnement et de transmission de mouvements : cette phase concerne le dimensionnement de la plate-forme en termes d'effort ou de couple, d'accélération et de vitesse et la façon dont nous souhaitons reproduire les mouvements tels que la réduction et la transformation de mouvement [21], [22]. Il faut noter qu'une erreur de sous ou surdimensionnement à ce niveau remettrait en cause tout le simulateur et les solutions de corrections s'avèrent parfois très couteuses. Cette étape trouve toute son utilité, aussi, lors de la synthèse des algorithmes de commande nécessitant la connaissance à posteriori des couples maximum délivrés par le système d'actionnement [23].

3.3.1.2 Modélisation et commande des simulateurs de conduite

La dynamique des véhicules terrestres (voiture ou moto) est très différente de celle des avions pour lesquels les simulateurs de conduite ont été initialement conçus. Cette dyna-

mique est généralement rapide (accélération/décélération fréquentes) comparée à celle des avions. Ceci est dû principalement au fait que le véhicule doit rester en contact avec la chaussée. Considérons un véhicule se déplaçant longitudinalement à vitesse constante de $30m/s$. L'arrêt de ce véhicule revient à l'application d'une accélération négative brusque (de l'ordre de $-7m/s^2$). Ce type de mouvement très rapide est très difficile à rendre au conducteur en utilisant un simulateur de conduite sur un espace de travail réduit ou limité (pour les plates-formes bas coût il est de 1 mètre voire 2 mètres au maximum). Ce manque d'informations inertielles n'est pas rencontré dans le cas des simulateurs de vol.

La dynamique des simulateurs moto est encore plus différente des deux autres (voiture et avion) à cause du rapport poids-puissance. Etant donné que la masse du motard est comparable à celle de la moto, la position du conducteur sur la moto affecte fortement la dynamique de l'ensemble (ajout d'un ou plusieurs degrés de liberté supplémentaires).

Nos travaux de recherche, adressant particulièrement la modélisation des plates-formes de simulation, concernaient la modélisation géométrique, cinématique et dynamique d'architectures série et parallèle (cas du simulateur moto) [20], [24]. Par ailleurs, le processus d'identification des paramètres inertiels, tels que les différentes masses/inerties, centres de gravité, coefficients de frottement, est plus qu'indispensable [25], [22], [20]. Un sous-chapitre entier fera la lumière sur les différents aspects de modélisation et les difficultés rencontrées.

Ces divers modèles sont utilisés en priorité pour l'exécution des trajectoires générées par les modules de commande, appelés aussi algorithmes de restitution de mouvements. Il existe trois types d'algorithmes dans la littérature, à savoir, algorithme classique, adaptatif et optimal. Le plus utilisé de tous est l'algorithme classique et ce pour des considérations de simplicité de mise en œuvre ainsi que le respect des contraintes temps réelles. Cependant, il n'existe pas de méthode de détermination des paramètres de ces "filtres", jusque là choisis arbitrairement. Pour répondre à ce manque, nous avons proposé une technique pour l'identification de ces paramètres avec prise en compte des limites géométriques, cinématiques et les capacités d'actionnement du simulateur, [22], [23]. Cette technique est jugée très utile par les spécialistes du domaine.

Les approches de commande existantes souffrent de quelques inconvénients où leur utilisation est faite sur la base d'un compromis à privilégier :

- L'algorithme basé sur la commande optimale utilise une erreur "sensitive", en comparant la sortie du modèle *véhicule virtuel*, afin d'avoir des sensations proches de celles des situations de conduites réelles et ce indépendamment des contraintes posées par l'architecture ;
- L'algorithme basé sur la commande adaptative, contrairement à celui d'avant, ne prend pas en compte les aspects perception et il s'adapte en fonction des courses disponibles. En d'autres termes, plus la course disponible est grande plus les retours inertiels sont meilleurs et plus les courses disponibles sont faibles plus les retours inertiels sont détériorés. Cet algorithme ne convient malheureusement pas aux plates-formes à bas coût caractérisées par des espaces de travail réduits.

Pour toutes ces raisons, j'ai voulu investiguer d'autres types de commande telle que la commande prédictive généralisée (GPC), [26]. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Monsieur Mohamed Larbi Saidi en coopération avec Monsieur Ahmed Abbassi de l'Université de Annaba. Malgré la simplicité de mise en œuvre et son respect aux contraintes temps réelles, cette méthode a été vite abandonnée pour diverses raisons, à savoir :

1 – L'éloignement du candidat et les conditions de suivi difficiles. J'ai réussi à l'inviter à deux reprises pour une durée d'un mois ;

2 – Le réglage des paramètres de la commande n'est pas immédiat pour un non-spécialiste des méthodes prédictives au regard de l'obtention d'un correcteur ayant une bonne performance robuste ;

3 – Le choix des modèles de référence dans le cas du GPC ne donne pas entière satisfaction en ce qui concerne les systèmes utilisés (simulateur de conduite) ;

4 – La marge de stabilité est faible en présence de phénomènes hautes fréquences.

3.3.1.3 Modélisation dynamique des véhicules terrestres

Ce module constitue une interface importante entre, d'un côté, les actions et consignes du conducteur (pédalier, boîte de vitesse, direction, contact pneu-chaussée, etc.) appliquées sur la plate-forme et, de l'autre coté, le module de contrôle et de restitution de mouvements. Le but de ces modèles est de reproduire un maximum d'effets inertiels et de respecter des contraintes temps-réel, en vue de son implantation dans une boucle de simulation centrée sur l'homme. Une section résumant nos contributions sera consacrée, plus tard, à ces modèles dynamiques.

3.3.1.4 Plates-formes de restitution de mouvements réalisées

Les travaux menés durant ces dernières années, dans le cadre des nombreux projets dont un BQR de l'UEVE (2005) et deux Predit-ANR (VIGISIM et SIMACOM) ont donné "naissance" à trois simulateurs de conduite fonctionnels, deux d'entre eux sont dédiés à la simulation de conduite automobile [22] [24] (figure 3.3) pour l'étude comportementale et le dernier dispositif est un simulateur de conduite pour les deux roues (le premier en France), [22]. Ce dernier simulateur est dédié, entre autre, à la conduite en milieu urbain et à la prévention des situations de danger telles que le dérapage de la roue arrière ainsi que l'apprentissage au bon dosage des freins (figure 3.4). Le simulateur moto a été réalisé dans le cadre de la thèse de Monsieur Lamri Nehaoua [27].

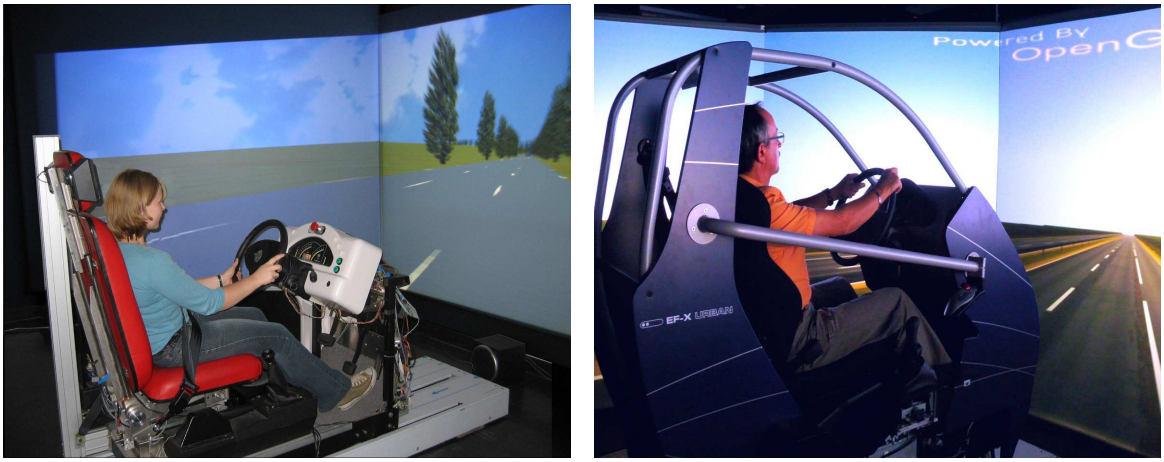

FIGURE 3.3 – *SIM^2 et le Simulateur "Lacet" : deux simulateurs de conduite à 2 degrés de liberté munis de retours d'effort sur guidon*

FIGURE 3.4 – *Simulateur de conduite deux roues à 5 degrés de liberté*

3.3.2 Vers un simulateur de fauteuil roulant

Mes travaux dans ce thème, de la simulation de conduite, se poursuivent par le développement de nouvelles architectures de simulation et toutes les adaptations induites au niveau de la commande, modélisation, etc.

En collaboration avec Messieurs Nicolas Séguy et Etienne Colle (laboratoire IBISC), nous travaillons sur la mise en place d'un nouveau simulateur de conduite pour fauteuil roulant. L'objectif sociétal d'un tel dispositif est l'aide à l'apprentissage de la conduite en fauteuil roulant, domaine qui intéresse plus particulièrement les experts cliniques. L'intérêt majeur du simulateur de conduite en fauteuil est la possibilité de placer en toute sécurité l'utilisateur embarqué sur son fauteuil dans un ensemble important de situations qui ne peuvent pas être toutes reproduites dans un parcours réel de test de fauteuil roulant. En outre, le système fournit à l'équipe de réadaptation des informations objectives pour l'aider dans l'adaptation du fauteuil à l'utilisateur et dans l'apprentissage de sa conduite. En effet, le simulateur se révèle un moyen privilégié pour créer des situations variées d'apprentissage de l'usage de l'aide technique. Il est possible d'envisager une série de scénarios qui amène progressivement la personne à découvrir puis dominer l'ensemble des fonctionnalités de l'aide technique.

Bien que le " projet " a été jugé pertinent et de qualité scientifique élevée (labélisé CapDigital et System@tic), il a été recalé à deux reprises dans le cadre d'appel à projet ANR-TECSAN. Le projet ne sera pas abandonné pour autant et nous œuvrons, avec les différents partenaires (Alcatel, Hopital de Garches, Nautilus, Université de Metz, etc.) pour sa concrétisation , en témoignent les diverses demandes de subventions sollicitées

auprès des tutelles : Université d'Evry et Génopole. Ces demandes financières ont été acceptées.

3.4 Véhicules deux roues : Aspects de modélisation et sécurité préventive

La qualité de rendu de mouvement, sur un simulateur de conduite de véhicule terrestre, est tributaire de plusieurs facteurs. La perception humaine (vision, kinesthésie, canaux vestibulaires, etc.), la mécanique des plates-formes mobiles utilisées (sa capacité à reproduire des mouvements proche de la réalité), les stratégies de commande utilisée pour la reproduction des mouvements et les modèles des véhicules terrestres sont les facteurs, une fois maitrisés, pouvant améliorer notablement la qualité de la conduite sur simulateur. La connaissance du modèle dynamique de la moto, considéré comme le générateur de trajectoires pour la plate-forme, est essentielle et sa synthèse doit être minutieuse en prenant en compte, entre autre, l'application à laquelle le simulateur de conduite est dédiée.

L'élaboration d'un modèle dynamique rigoureux pour les deux roues reste une tâche complexe. Les différents travaux liés à ce sujet présentent des modèles simplifiés dépendant fortement de la problématique traitée. En effet, l'analyse de la maniabilité ou du contrôle du mouvement des deux roues autour des trajectoires en quasi-équilibre telles que, le mouvement en ligne droite ou en virage, est en général basée sur un modèle linéaire qui découle de la théorie des petites perturbations [28] [29]. Ce type de modèle ne fournit qu'une idée locale sur la dynamique des deux roues, et il ne peut pas être utilisé comme un générateur de consignes dans la problématique de la simulation de conduite. La littérature propose également des modèles non linéaires pour décrire au mieux la dynamique des deux roues. Mais, dans ce cas également, certaines hypothèses simplificatrices ont été formulées pour rendre l'obtention de ce modèle plus aisée, telles que, par exemple, le découplage entre la dynamique longitudinale et la dynamique latérale.

Conscient de ces exigences, j'ai entamé des recherches, en collaboration avec Monsieur N. Séguy, sur la modélisation des véhicules à deux roues avec prise en compte de la contrainte temps réelle exigée dans les applications de simulation de conduite. Un premier travail a été lancé dans le cadre d'un post-doc de Monsieur S. Hima ayant pour objectif la mise en place de modèle dynamique d'un *deux roues* en se basant sur la technique de Newton-Euler récursif [30], [31]. Cette technique permet pour une structure arborescente avec des articulations simples d'utiliser les données cinématiques du corps antécédents afin de calculer la dynamique du corps en question. Par conséquent, le nombre d'opérations est considérablement réduit ainsi que le temps de calcul, en plus de la simplicité de mise en œuvre. Nous avons adapté cette approche à la moto afin de refermer la chaine cinématique convenablement avec les efforts de contact pneu-chaussée. Par ailleurs, nous avons apporté plusieurs modifications aux différents modèles existant dans la littérature pour l'adapter à nos applications de simulations de conduite. Ce dernier travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de L. Nehaoua, en proposant une extension à la dynamique moto [28] (modèle utilisé pour le projet SUMOTORI, initialement dédié à l'étude de la dynamique latérale de la moto) par l'ajout de degrés de liberté nécessaires pour la génération de trajectoires, tels que la dynamique longitudinale, les effets de la suspension ainsi que le transfert de charge.

Un second travail de modélisation multiphysique de véhicules à deux roues est en cours d'élaboration en utilisant des approches de Bond Graph. Un premier stage, de Monsieur K. Belharet, a permis de modéliser les dynamiques des mouvements de translation (longitudinale, verticale et latérale) ainsi que le mouvement rotation roulis. L'objectif à long terme est d'arriver à développer un modèle incluant aussi les parties de motorisation ainsi que les différentes interactions, telles que roues-sol. Ces travaux ont été initiés en collaboration avec H. Imine (LCPC, Paris) et R. Merzouki (LAGIS, Lille) et seront poursuivis dans le cadre d'un post-doc.

L'implémentation de ces différents modèles dynamiques dansles les applications de simulation de conduite nécessiterait la connaissance de quelques paramètres inertiels du véhicule (identification) ainsi que les forces exterieures agissant sur la moto, telles que : celle dues aux contact pneu-chaussée, aérodynamique ou encore le couple conducteur. Cette dernière force est considérée comme entrée principale du modèle qu'il va falloir estimé. Pour ce faire, nous avons développé deux outils d'estimation [32] : le premier basé sur la connaissance du modèle de la colonne de direction du simulateur et le deuxième est un observateur de Luenberger.

Mes récents travaux de recherche sur les simulateurs de conduite, spécialement pour les véhicules à deux roues, m'ont permis d'initier une nouvelle thématique émergente sur le développement de système de sécurité préventive capables de détecter une situation de conduite critique. Cette nouvelle direction est motivée par le fait que les véhicules à deux roues souffrent "d'insuffisance sécuritaire" comparés aux véhicules standards, pour lesquels les progrès ont permis d'atteindre des niveaux de sécurité très satisfaisant (ABS, Airbags, ESP, etc.). Dans ce cadre, je co-encadre avec S. Mammar une thèse, de H. Slimi, sur la mise en place d'un système de génération d'alertes pour éviter la perte de contrôle de véhicules à deux roues motorisés. Les premières recherches nous ont permis d'établir plusieurs fonctions de risque permettant de calculer le roulis et la vitesse longitudinale acceptables lors de la prise de virage [33] [34] [35]. Le calcul de ces seuils de sécurité sont évalués à partir de connaissances sur la dynamique propre de la moto, sur les attributs de la route (élévation, pente, etc.) et le comportement du conducteur (adhérence mobilisée). La prochaine étape sera consacrée d'une part, à l'instrumentation d'un scooter nous permettant de valider nos modèles dynamiques et ainsi servir de benchmark pour le système de sécurité préventive, et d'autre part, d'étendre et d'appliquer les techniques d'aide à la conduite (contrôle latéral, gestion sûre des inter-distances, contrôle de la vigilance) aux véhicules à deux roues.

Les travaux sur ce thème se poursuivent, d'une part, par le développement d'une moto automatisée. Cette idée passionnante fait l'objet de la thèse de A. Khettat démarrée en octobre 2009 en collaboration avec des instituts spécialisés LCPC-IEF-INRETS. D'autre part, nous nous dirigeons vers la synthèse d'observateurs pour les véhicules deux roues (modèle fortement non-linéaire) servant de base pour "alimenter" le système d'alerte. Ce travail sera assuré dans le cadre de la thèse, financé par un contrat doctoral de l'université d'Evry, de Ch. Chenane qui débute en septembre 2010.

3.5 Résumé des principales contributions scientifiques

Les principaux apports scientifiques de mes activités de recherche sont :

– Des apports scientifiques sur les méthodes (prédictives et passives) de stabilisation

du rendu haptique en présence de retard de transmission constant ou variable pour des applications d'ingénierie concourantes ou collaboratives ;
- Des apports scientifiques sur les algorithmes de restitution de mouvement pour les simulateurs de conduite, notamment une méthode de paramétrage des filtres Washout ;
- Des apports théoriques et techniques sur les plates-formes de restitution de mouvements pour les simulateurs de conduite (auto/moto) ;
- Réalisation de trois prototypes de simulateurs low-cost à base mobile dont un dédié aux véhicules à deux roues (le premier en France) ;
- Des apports théoriques sur la dynamique de véhicules de deux roues et la synthèse de fonctions de risque pour un système de génération d'alertes sur motos.

3.6 Animations d'équipes et coopérations scientifiques

3.6.1 Animation d'équipes

Après mon recrutement qui a coïncidé avec le départ d'Abderrahmane Kheddar au Japon pour un détachement CNRS, j'ai repris à sa demande la responsabilité " locale " au sein du groupe. Cette responsabilité s'est traduite dans un premier temps par le suivi du réseau d'excellence INTUITION par ma participation aux différentes réunions sur la Réalité Virtuelle en Europe et dans le monde. En 2003, Hakim Mohellebi venait de terminer sa première année de thèse sous la direction de Kheddar qui m'a sollicité pour suivre les travaux de thèse en orientant les recherches vers la conception d'une plate-forme mobile à bas coût et ainsi consolider la collaboration naissante avec l'INRETS sur cette thématique. Un contrat de collaboration entre IBISC et INRETS a été signé en fin 2008. Néanmoins, le démarrage de mes travaux de recherche lors des deux premières années a été difficile et elles ont été mêlées à d'autres responsabilités administratives très lourdes, en l'occurrence, la gestion des stages en entreprise pour plus de 270 étudiants de Master, ce qui a rendu le suivi des travaux de recherche assez délicat dans les premiers temps.

Le montage d'une équipe autour des activités de simulations de conduite a commencé concrêtement à partir de ma deuxième année de recrutement, début 2005. Je me suis dévoué à ce défi à plein temps à cause du fait qu'il n'y avait pas un important recul dans le domaine au laboratoire. D'un autre coté, les moyens dont je disposais n'étaient pas importants afin de lancer des collaborations d'égal-à-égal et ainsi sortir de la "sous-traitance" appliquée par les grandes institutions. De ce fait, j'ai participé dans le montage de deux projets PREDIT-ANR (2005-2009) et ainsi qu'à la demande de subventions auprès des plusieurs institutions et tutelles (voir liste des projets). Ces moyens m'ont permis, d'une part l'acquisition d'importants matériels pour la réalisation de plates-formes mobiles, et d'autre part recruter des thésards, un post-doctorant et plusieurs stagiaires de Master ainsi que d'attirer des collègues au sein du laboratoire vers cette nouvelle thématique. Mon équipe de recherche était chargée de trois axes de recherche :

- Modélisation dynamiques des véhicules à deux roues ;
- Conception et modélisation des plates-formes à restitution de mouvement pour les simulateurs de conduite ;
- Synthèse des algorithmes de restitution de mouvements pour les plates-formes mobiles.

La composition de l'équipe, dont j'avait la charge, est la suivante :

- 02 maîtres de conférences, dont moi-même et Nicolas Séguy spécialiste de la modélisation dynamique des systèmes multi-corps ;
- 02 doctorants inscrits à l'université d'Evry, l'un affilié à IBISC et le deuxième est au MSIS-INRETS ;
- 01 post-doctorant recruté pendant la durée des deux projets PRDIT-ANR.

Cette équipe a joué un rôle très significatif dans la réussite des projets et des collaborations tout au long de ces dernières années (2005 à ce jour).

Par ailleurs, je participe depuis 2008 à la nouvelle thématique autour de la sécurité préventive sur les deux roues initiée par Saïd Mammar. J'apporte mes compétences en modélisation des véhicules (notamment deux roues), détection des situations accidentogènes, assistance au conducteur (système à rendu haptique), etc. Je co-encadre avec Mammar deux thèses celle des Messieurs Slimi et Chenane. Dans le cadre aussi des récrutements

de Maître de conférences en 2010, un nouveau membre, Dalil Ichalal, a rejoint l'équipe et son intégration m'a été confiée.

Dans une moindre mesure et à partir de la fin de l'année 2008, je collabore avec Philippe Hoppenot, dans le cadre du projet Européen CompanionAble, sur la mise en place d'un système d'interaction haptique via le réseau Internet pour le contrôle d'un robot mobile dédié à l'assistance aux personnes dépendantes. Lors de ce travail, j'ai pu diriger les reflexions autour de cette interaction et aussi encadré un post-doc et un stagiaire de Master2.

3.6.2 Collaboration avec d'autres équipes de recherche

Les applications de simulation centrées humain sont réputées pluridisciplinaires du fait de l'association de plusieurs systèmes de natures différentes (biologique, mécatronique, informatique, etc.). Cette pluridisciplinarité requiert donc des compétences extérieures obtenues par le biais de coopérations fortes. J'ai instauré, par conséquent, plusieurs collaborations fructueuses avec divers laboratoires.

3.6.2.1 Relations nationales

- **2009 - à ce jour : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC)**. Mes collaborations avec H. Imine, chargé de recherche, 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 (Février-Juillet 2009) un stagiaire de Master2, K. Belharet, sur la modélisation des véhicules deux roues par des techniques basées sur le Bond Graph. Publications communes : [32].
- **2007 - à ce jour : Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS UMR CNRS 8146)**. Mes collaborations avec R. Merzouki, Maître de Conférences HDR, sur la modélisation des véhicules deux-roues par des techniques de Bond-Graph et co-encadrement de stage de Master2, K. Belharet. Par ailleurs, nous avons co-organisé la conférence CISA'08 où Merzouki s'est chargé du Programme de la conférence. Publications communes : [36] et un chapitre de livre (en cours de publication).
- **2003 - à ce jour : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS-MSIS)**. Mes collaborations avec S. Espié, directeur de recherche, portent sur le développement de simulateurs de conduite véhicule automobile et moto. Les travaux communs ont été assurés essentiellement dans le cadre de la co-tutelle de 03 thèses : H. Mohellebi, L. Nehaoua et A. Khettat ainsi que plusieurs stages de Master. Publications communes : [37], [17], [38], [23], [18], [19], [22], [20], [32], [24].
- **2005 - à ce jour : Institut d'Electronique de France (IEF)**. Collaboration avec S. Bouaziz, Professeur à Paris12, dans le cadre des projets PREDIT-ANR SIMACOM et VIGISIM sur les aspects architecture de communication pour les applications de simulation de conduite. Nous co-encadrons ensemble la thèse de A. Khettat, dont il est directeur. Publications communes : plusieurs rapports de recherche.
- **2008 - 2010 : Hôpital Raymond Poincaré à Garches**. Collaboration avec l'équipe du Professeur F. Lofaso sur la mise en place d'un simulateur pour personnes à mobilité réduite en vue de l'apprentissage et l'aide au choix de fauteuil roulant. Deux soumissions pour des porjets nationaux type ANR ont été refusées. Une troisième "tentative" est en cours de montage.

- **2008 - 2009 : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS-LEPSIS)**. Collaboration avec R. Lobjois, chargé de recherche INRETS, dans le cadre d'un projet ANR Jeunes Chercheuses - Jeunes Chercheurs pour la mise au point d'une plate-forme de simulation pour l'étude du comportement conducteur moto dans la prise de virage.
- **2005 - 2006 : Laboratoire Signaux et Systèmes (L2S)**. Collaboration ponctuelle avec A. Sid-Ali sur l'implémentation de lois de commande robustes sur une interface haptique dans le cadre de la thèse de L. Burlion.
- **2003 - 2008 : IRISA de Rennes**. Collaboration avec A. Lécuyer, chargé de recherche INRIA, dans le cadre du Réseau d'Excellence INTUITION.
- **2000 - 2001 : Commissariat à l'Energie Atomique (CEA)**. Collaboration avec C. Andriot et A. Micaelli sur les algorithmes de commande de dispositifs haptiques en présence de retard de transmission (pendant la thèse).

3.6.2.2 Relations internationales

- **2009 - 2011 : University d'Essex, Grande Bretagne**. Collaboration avec H. Hagras, Professeur, dans le cadre de l'organisation de la conférence CISA 2011 en Egypt.
- **2008 - à ce jour : Laboratoire d'Ingénierie Mathématique (LIM), Tunisie**. Collaboration avec A. Abichou, Professeur, dans le cadre de l'organisation de la conférence CISA 2009 en Tunisie. Un programme pour une co-tutelle de thèse est en cours de montage.
- **2008 - à ce jour : Saint Mary's University(SMU), Halifax, Canada,)**. Collaboration avec A. Merabet, Assistant Professeur, dans le domaine de la commande des machines électriques et des robot mobiles. Publications communes : [39] , [40].
- **2008 - à ce jour : Sharjah University, Emirates Arabes Unies**. Collaboration avec Bettayeb, Professeur, dans le domaine de la commande des dispositifs haptiques. Un programme, pour la co-organisation d'une édition de la conférence CISA, est en cours de montage.
- **2004 - 2008 : Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba, Algérie)**. Collaboration avec H. A. Abbassi, Professeur et directeur du laboratoire, dans le cadre du co-encadrement de thèse de L. Saidi et de la co-organisation de la conférence CISA 2008 en Algérie. Publications communes : [26], [36].

3.6.3 Projets et responsabilités

3.6.3.1 Projets en cours et financements

- **2008 - 2012** : Projet Intégré Européen du 7me PCRD, CompanionAble (Integrated Cognitive Assistive & Domotic Companion Robotic Systems for Ability & Security). Plus de 20 partenaires européens (chercheurs, industriels, médecins et académiques). Site web : `http://www.companionable.net/`.
- **2010 - 2011** : Financement Laboratoire d'une Action Incitative "AI" en vue de l'instrumentation du Scooter électrique disponible au laboratoire IBISC. Budget : 6700 €.
- **2009-2010** : Dotation Génopole pour financement d'un équipement semi lourd type robot Hexapode dans le cadre de la réalisation d'un simulateur de fauteuil roulant. Budget : 23000 €.

– **2009 - 2010** : Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université d'Evry Val d'Essonne pour la réalisation d'un simulateur de fauteuil roulant. Budget : 27000 €.

3.6.3.2 Projets terminés

– **2008 - 2009**, Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université d'Evry Val d'Essonne pour le prolongement du financement de thèse de Lamri Nehaoua. Budget : 10000 €.
– **2006 - 2009**, Dans le cadre des projets **PREDIT-ANR** : SIMulateur de détection des altérations du comportement de conduite liées à l'attention et à la VIgilance (**VIGISIM**). Budget : 40 k€, durée 4 ans. Les partenaires sont :
  ◇ Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)
  ◇ CHU Bordeaux, Université de Caen (UPRES EA2131)
  ◇ Centre de recherche du service de santé des armées (CRSSA, La Tronche)
  ◇ Institut d'Electronique de France (IEF), University of Paris 11, Orsay
  ◇ DEVELTER, SARL, Voisin le Bretonneux.
– **2006 - 2009**, Dans le cadre des projets **PREDIT-ANR** : SIMulateur pour l'Apprentissage de la COnduite de 2 roues Motorisés (**SIMACOM**). Budget : 62 k€, durée 4 ans. Les partenaires sont :
  ◇ Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)
  ◇ Centre européen d'études de sécurité et d'analyse des risques (CEESAR)
  ◇ Institut d'Electronique de France (IEF), University of Paris 11, Orsay
  ◇ DEVELTER, SARL, Voisin le Bretonneux.
– **2007 - 2008**, Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université d'Evry Val d'Essonne pour l'organisation de la conférence CISA'08. Budget : 7000 €.
– **2005 - 2006**, Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université d'Evry Val d'Essonne pour la mise en place d'un simulateur deux roues. Budget : 15000 €.
– **2003 - 2008**, Réseau d'Excellence INTUITION (thematIc NeTwork on virtUal reality and virtual environments applicaTIONs for future workspaces, 6me PCRD), Contract IST-NMP No 507248. Budget : 600 k€, durée 4 ans et plus de 60 partenaires européens (chercheurs, industriels et académiques). Site web : `http://www.intuition-eunetwork.net`.

3.6.3.3 Responsabilités et Représentations

– **2009 - à ce jour**, Membre du comité de sélection, section 61-63 de l'Université d'Evry.
– **2009 - à ce jour**, Membre du vivier de spécialistes externes section 61-63 de l'Université de Créteil.
– **Décembre 2008**, Participation en tant qu'encadrant scientifique au jury de thèse de Lamri Nehaoua, Université d'Evry Val d'Essonne.
– **2007 - à ce jour**, Membre élu du Conseil Scientifique de l'Université d'Evry Val d'Essonne.
– **Mai 2007**, Participation en tant que rapporteur au jury de thèse de Adel Merabet, Université de Chicoutimi, Québec.
– **2006 - 2009**, Membre de la commission de spécialistes section 61-63 de l'Université d'Orsay en tant que titulaire.
– **2006 - 2007**, Responsable des emplois du temps (toutes filières confondues) à l'UFR Sciences et Technologies de l'Université d'Evry Val d'Essonne.

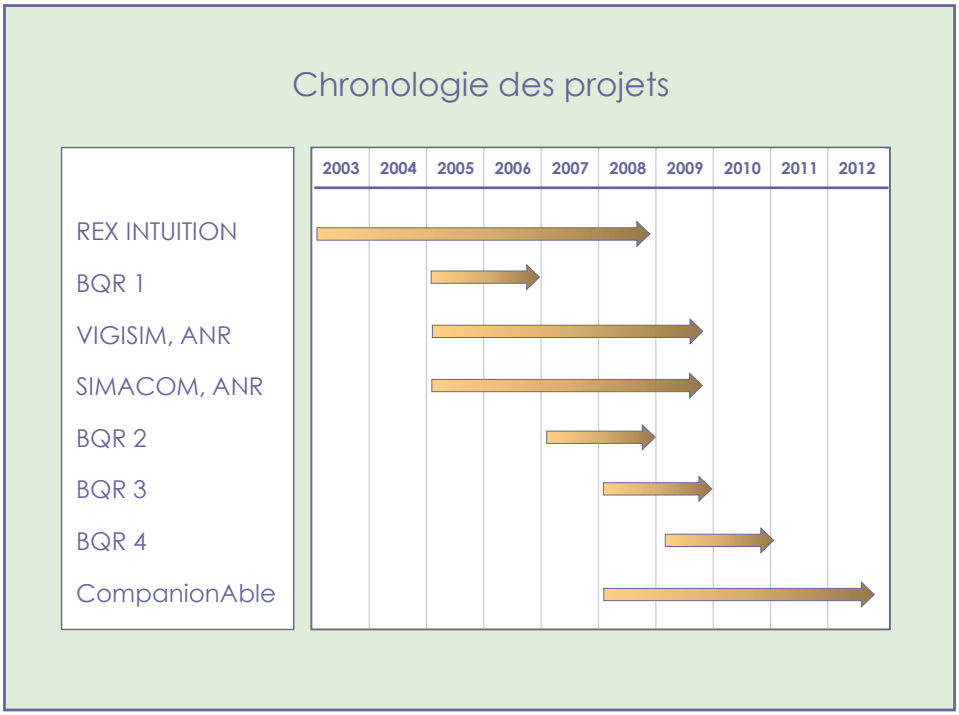

FIGURE 3.5 – *Chronologie des projets.*

- **2005 - à ce jour**, Responsable des activités Simulation et Simulateurs de conduite au laboratoire IBISC.
- **2004 - 2009**, Membre de la commission de spécialistes section 61-63 de l'Université d'Evry Val d'Essonne.
- **2004**, Responsable de la Journée des Doctorants au laboratoire IBISC et organisation de séminaires internes.
- **2003-2006**, Responsable des stages professionnels de Maîtrise (Master 1) et DESS (Master 2) à l'UFR Sciences et Technologies de l'Université d'Evry Val d'Essonne.
- **2003 - 2004**, Membre de l'action spécifique CNRS, numéro 131 sur les " Interfaces et Informations Haptiques " dans le cadre du RTP 15 " Interfaces Médiatisées et Réalité Virtuelle ", site web : `http://lsc.univ-evry.fr/~ashaptics/`.
- **2003 - à ce jour**, Membre des groupes de travail GDR ISIS, MACS (groupe systèmes à retard) et Robotique.

3.7 Activités d'Encadrements

Depuis mon recrutement, j'ai participé à divers encadrements de thèses de doctorat, stage de Master2 (ex DEA) et Master1 (ingénieurs maîtres) ou même de post-doctorants. Concernant les thèses de doctorat, trois (03) ont été déjà soutenues (2005, 2006 et 2009) et deux (02) sont en cours. Du fait de la pluridisciplinarité de certains sujets de thèse, leur suivi a nécessité le concours à plusieurs compétences et menées en collaboration avec des collègues.

3.7.1 Encadrements de Post-Doctorants

- **Avril 2009 - Octobre 2009**
  Post-doctorant : Zheng Dai
  Sujet : *Téléopération via Internet de Robots pour Assistance à domicile de personnes à mobilité réduite.*
  Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre 3190.
  Professeur responsable : Mr Philippe Hoppenot
  Encadrement : H. Arioui (80%), Ph. Hoppenot (20%)
  Financement : Contrat de CDD, Projet Européen CompanionAble.
  Résumé : Le maintien à domicile des personnes âgées atteintes de troubles cognitifs requiert des moyens de télévigilance afin d'assurer la sécurité de la personne et la possibilité de stimuler cognitivement la personne pour l'aider à conserver son autonomie. Des moyens de détection de ces situations alarmantes et de stimulation cognitive commencent à exister, mais ils se heurtent encore à des problèmes de fiabilité et d'efficacité principalement dus à l'éloignement des personnels soignants. L'équipe HANDS du laboratoire IBISC est investie dans un projet européen visant à développer un support de stimulation cognitive et de gestion de la thérapie pour ces personnes. Il sera construit autour d'un robot mobile compagnon en relation avec un environnement de type habitat intelligent. Dans le cadre de ce projet, nous proposons de donner à l'opérateur distant (personnel soignant ou de télévigilance) un moyen d'interaction avec la personne à domicile sous la forme d'une commande à distance du robot mobile semi-autonome.
  Le travail effectué par Z. DAI est principalement la mise en place d'une architecture de simulation haptique afin de permettre à l'opérateur distant d'entrer en interaction avec le patient par l'intermédiaire du robot. Cette distance opérateur-robot sous-entend un temps de transmission, parfois non négligeable, pouvant rendre l'interaction homme-machine instable ou du moins non praticable. Les approches de stabilisation utilisées se basent exclusivement sur les travaux de ma thèse de doctorat.
  La deuxième partie de ce post-doc était la mise en œuvre des résultats précédents sur une architecture d'interaction opérateur / robot mobile existant. Cette partie a été retardée quelques mois pour des raisons purement matérielles.
  Position actuelle : en poste d'ATER.

- **Février 2006 - Novembre 2008**
  Post-doctorant : Salim Hima

Sujet : *Modélisation dynamique d'un véhicule deux roues, en vue de la génération de trajectoires pour un simulateur de conduite.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre 3190.
Professeur responsable : Mr Abderrahmane Kheddar
Encadrement : H. Arioui (100%)
Financement : Contrat de CDD, Projets SIMACOM et VIGISIM.
Résumé : Deux tâches ont été confiées à Salim Hima pendant ses 33 mois de post-doc.
La première tâche était le développement d'un modèle dynamique *fin* d'un véhicule deux roues pouvant respecter des contraintes temps réelles ou de rapidité d'exécution par rapport approches dites classiques (Lagrange, Newton, etc.) . Cette technique de modélisation se base sur la récursivité de l'approche de Newton et permet pour une structure arborescente avec des articulations simples d'utiliser les données cinématiques du corps antécédents afin de calculer la dynamique du corps en question. Par conséquent, le nombre d'opérations est considérablement réduit ainsi que le temps de calcul, en plus de la simplicité de mise en œuvre. Nous avons adapté cette approche à la moto afin de refermer la chaine cinématique convenablement avec les efforts de contact pneu-chaussée modélisés via un système de " ressort-amortisseur ". Plusieurs travaux ont été publiés pour prouver la véracité de l'approche ainsi que sa rapidité. Cette dernière contrainte est primordiale pour les applications de simulation de conduite afin d'asservir une très bonne cohérence entre les effets visuels et les rendus de mouvements de la plate-forme dictés par le modèle dynamique, assez fidèle dans notre cas. Une validation dudit modèle est requise après la fin des modifications apportées au simulateur de conduite moto. Ce travail a été assuré dans le cadre du projet PREDIT ANR SIMACOM.
La deuxième tâche consiste en la modélisation, commande et la mise en marche du simulateur " Lacet ". Dans cette partie, l'aspect technique est prédominant du fait du recul que nous avons sur ce type de simulateur. En effet, ce simulateur est une extension d'un premier simulateur déjà construit dans le cadre de la thèse de Hakim Mohellebi (voir ci-dessous). Cette extension concerne l'ajout d'un mouvement Lacet afin d'étudier l'effet de cette composante (ou son absence) sur l'aggravation du mal du simulateur, qui apparaît au bout d'un quart d'heure d'exercices. Les premières conclusions confortent nos hypothèses de l'importance du mouvement lacet dans un simulateur de conduite sur véhicule. Ce travail a été assuré dans le cadre du projet PREDIT ANR VIGISIM.
Position actuelle : Ingénieur de recherche, contrat CDD, au laboratoire LIVIC.
Communications : 5 communications parues [41], [30], [21], [42], [43], deux revues [20, 24] et une revue en cours de révision.

3.7.1.1 Récapitulatif

L'activité d'encadrement des pos-doctorants peut être résumée par le tableau suivant :

Post-doctorants	Périodes	Mots clés	Conf. / Revues
Zheng Dai	Avr.-Oct. 09	Haptique et Robotique Mobile	0
Salim Hima	Fév. 06-Nov. 08	Simulateurs de Conduite	5 / 2

3.7.2 Encadrements de thèses

- **Septembre 2010 - Décembre 2013**
  Doctorant : Chabane Chenane
  Sujet : *Observation des véhicules de deux roues*
  Laboratoire d'accueil : IBISC, UEVE, Evry.
  Professeur responsable : Mr Saïd Mammar, Professeur
  Encadrement : H. Arioui (40%), D. Ichalal (40%), S. Mammar (20%)
  Financement : Bourse de thèse UEVE.
  Résumé : Dans l'optique d'un système d'alertes implémenté sur un véhicule de deux roues, afin de prévenir le conducteur face à des situations dangeureuse, j'ai fait la demande d'un financement de thèse pour l'observation des états dynamiques des motos. Cette observation est essentielle pour le bon fonctionnement du système d'alertes. Les défis à relever pour cette thèse sont ceux relatifs à l'observation des systèmes dynamiques fortement non-linéaires (type motos) ainsi qu'aux contraintes temps réelles exigés par le type d'application.

- **Octobre 2009 - Octobre 2012**
  Doctorant : Amine Khettat
  Sujet : *Automatisation du pilotage d'un deux-roues motorisé : modélisation dynamique, instrumentation et contrôle*
  Laboratoire d'accueil : LEPSIS, UMR INRETS-LCPC, Paris.
  Professeur responsable : Mr Samir Bouaziz, Professeur à l'université de Paris 12.
  Encadrement : H. Arioui (25%), H. Imine (25%), S. Espié (25%), S. Bouaziz (25%)
  Financement : Bourse de thèse LCPC.
  Résumé : Les travaux proposés dans le cadre de cette thèse concernent : 1) la mise au point d'un système (instrumentation et enregistrement) permettant la validation de modèles dynamiques de motos réelles, 2) le développement d'un modèle de dynamique moto à base de technique de Bond Graph prenant en compte les aspects motorisation et informations capteurs, 3) la validation du modèle dynamique, 4) le développement d'un algorithme de contrôle de la trajectoire d'une moto dans plusieurs configurations : conduite en fil, changement de voie, prise de virage, etc. et 5) la validation de l'algorithme de contrôle 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 " (i.e. dotée d'actionneurs pour le guidon, l'accélérateur et les freins) dont on complètera l'instrumentation (couple guidon, capteurs de pression...) et sur les dispositifs de mesure et d'enregistrement de la dynamique moto pour mener les expérimentations sur piste.
  A terme, les travaux menés dans cette thèse permettront de tester les systèmes de sécurité actifs en autorisant des séquences reproductibles sur piste et à grande vitesse.
  Communications : Une communication parue à la conférence Mechatronics 2010, [32].

– **Septembre 2007 - Décembre 2010**
Doctorant : Hamid Slimi
Sujet : *Vers une assistance à la conduite préventive des véhicules de type deux roues motorisés*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Professeur responsable : Mr Saïd Mammar
Encadrement : H. Arioui (50%), L. Nouvelière (30%), S. Mammar (20%)
Financement : Contrat de CDD, Projet ANR e-Motive.
Résumé : Depuis une vingtaine d'année, les systèmes d'aide au freinage et les systèmes de commande de traction se démocratisent sur les véhicules. Pendant la même période, le retard pris par les deux roues (moto et scooters) s'accroît continuellement. Comme exemple, l'ABS, qui existe depuis presque 15 ans, est encore réservé à quelques modèles. Le répartiteur de forces de freinage est moins onéreux mais reste toujours marginal dans l'ensemble du marché, etc.
Le travail de thèse s'inscrit dans la thématique de la compréhension de la dynamique des 2 roues permettant la détection de situations accidentogènes afin de proposer des systèmes d'assistance préventive. Les objectifs peuvent être listés comme suit :
  – Acquérir la connaissance sur le comportement des véhicules à deux roues dans les situations précédant l'accident.
  – Prouver la faisabilité des systèmes capables de détecter une situation critique à bord de la moto.
  – Concevoir un simulateur à bord du système afin d'avertir le conducteur et/ou activer les systèmes passifs ou actifs de sécurité.

Durant les deux premières années de la thèse, un modèle de 2 roues à 4 corps associant la dynamique de la moto et un module de commande a déjà été développé. Il assure la stabilisation du mouvement de roulis de la moto par l'action sur le couple de direction ou par l'action sur l'angle d'inclinaison du conducteur par rapport à la moto. Ce modèle est aujourd'hui validé sur la base de mesures réalisées sur le site d'essais du LCPC Nantes. D'autres développements sont en cours.
Les prochaines investigations concerneraient l'étude de la dynamique limite des forces de contact en lien avec les attributs de la route et de définir des scénarios d'assistance qui seront intégrés au simulateur et évalués.
Communications : 4 communications parues [44], [34], [33], [35] une publication dans une revue est en cours de rédaction.

– **Février 2005 - Décembre 2008**
Doctorant : Lamri Nehaoua
Sujet : *Conception et réalisation d'une plate-forme mécatronique dédiée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues motorisés.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190 & MSIS-INRETS.
Professeur responsable : Mr Abderrahmane Kheddar
Encadrement : H. Arioui (90%), A. Kheddar (10%)
Financement : Contrat de CDD Projet Européen ToucHapsys (18 mois), Contrat CDD INRETS (18 mois) et BQR UEVE (03 mois).
Date de soutenance : 10 Décembre 2008 avec la mention très honorable devant le jury

M. K. Youcef-Toumi	Professeur au MIT, Cambridge, USA	Rapporteur
M. F. Pierrot	Directeur de Recherche au CNRS, LAAS	Rapporteur
M. J. C. Popieul	Professeur, Université Valencienne	Président
M. A. Kemeny	Directeur de Recherche, Renault	Examinateur
M. A. Kheddar	Directeur de Recherche CNRS	Directeur
M. S. Espié	Directeur de Recherche LCPC	Examinateur
M. N. Séguy	Maître de conférences à l'UEVE	Examinateur
M. H. Arioui	Maître de conférences à l'UEVE	Examinateur

Résumé : Centrée sur la formation à la conduite des 2 roues motorisés, le projet de cette thèse a pour objectif de définir les spécifications d'un simulateur de conduite permettant l'apprentissage des comportements pertinents en situations de freinage d'urgence, et ce pour des 2 roues équipés ou non de système(s) d'assistance(s) au freinage. L'objectif sera de répondre aux caractéristiques de coût et de transportabilité du simulateur cible tout en préservant les sensations nécessaires à la formation. Les premiers travaux effectués dans le carde de cette thèse étaient l'établissement d'un cahier des charges précis pour le développement d'un premier prototype de simulateur. Pour y arriver, Lamri Nehaoua a analysé d'une manière exhaustive la dynamique des véhicules moto. Des modèles de contrôle ont été adaptés à notre problématique de simulation de conduite. Ensuite, en connaissant l'architecture mécanique du simulateur, il a développé des modèles permettant la commande des différents actionneurs de la plate-forme à partir des mouvements désirés déjà calculés. Une fois que la conception de la plate-forme est achevée, le doctorant a effectué un travail fastidieux sur l'instrumentation du simulateur et a proposé des solutions électroniques robustes et fiables facilement duplicables.
La suite des travaux a concerné particulièrement la validation du simulateur et les approches de commande proposées.
Position actuelle : Post-Doctorant au Laboratoire LAMIH à Valencienne.
Communications : 11 communications parues [45], [23], [38], [31], [19], [18], [21], [30], [25], [43], [42], 03 publications dans des revues [20], [22] [24].

– **Octobre 2001 - Décembre 2005**
Doctorant : Hakim Mohellebi
Sujet : *Optimisation d'un simulateur de conduite automobile pour l'étude comportementale du conducteur.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190 & MSIS-INRETS.
Professeur responsable : Mr Abderrahmane Kheddar
Encadrement : H. Arioui avec A. Kheddar(50%), S. Espié (50%)
Financement : Bourse INRETS.
Date de soutenance : 10 Novembre 2005 avec la mention très honorable devant le jury

M. J. L. Vercher	Directeur de Recherche au CNRS	Rapporteur
M. J. C. Popieul	Professeur, Université Valencienne	Président
M. A. Kemeny	Directeur de Recherche, Renault	Rapporteur
M. A. Kheddar	Directeur de Recherche CNRS	Directeur
M. S. Espié	Directeur de Recherche LCPC	Examinateur
M. P. Gauriat	Ingénieur de Recherche à l'INRETS	Examinateur

Résumé : Les simulateurs de conduite sont des outils de réalité virtuelle interactifs dont certains sont dédiés à l'étude du comportement du conducteur en particulier dans des situations qu'il serait difficile, sinon impossible ou dangereux de présenter en réalité. Pour certaines situations simulées, en l'absence de restitutions inertielles, la tâche de conduite devient irréaliste ce qui rend problématique la validité des observations du comportement du conducteur. Compte tenu des connaissances en psychophysiologie de la perception du mouvement, des simulateurs avec plate-forme mobile ont été développés. Si le mouvement idéal est celui du véhicule réel, les réalisations actuelles font toutes des compromis sur la représentation des effets inertiels en privilégiant souvent certaines manœuvres en fonction des usages prévus. Notre démarche se situe dans la recherche des restitutions inertielles et kinesthésiques minimales pour rendre la tâche de conduite crédible pour des situations ordinaires, contrôle latéral du véhicule et conduite en file en particulier.
Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse ont donné naissance à un premier simulateur de conduite à base mobile muni de 2 degrés de liberté. Ces deux mobilités concernent le mouvement longitudinale et le mouvement de rotation du siège. Des tests de validation matérielle ainsi que psychophysiques ont été menées sur cette plate-forme.
Position actuelle : Ingénieur de Recherche au TechnoCentre à Renault-Guyancourt.
Communications : 3 communications parues [17], [23], [38], une publication dans une revue [22] et un chapitre de livre [37].

– **Septembre 2000 - Juillet 2006**
Doctorant : Mohamed Larbi Saidi
Sujet :*Implémentation de lois de commande prédictives pour le contrôle des platesformes à restitution de mouvement.*
Laboratoire d'accueil : LASA, Annaba & IBISC-CNRS Fre3190.
Professeur responsable : Mr Hadj Ahmed Abbassi, Professeur.
Encadrement : H. Arioui (40%), H. A. Abbassi (60%)
Financement : Chargé de cours à l'Université de Annaba (en parallèle de la préparation de la thèse).
Date de soutenance : 02 Juillet 2006 avec la mention très honorable devant le jury

M. M. A. Bedda	Professeur, KFU, Arabie Saoudite	Président
M. N. Doghmane	Professeur, Université Annaba	Rapporteur
M. H. Tebbikh	Professeur, Université Guelma	Rapporteur
M. H. A. Abbassi	Professeur, Université Annaba	Directeur
M. H. Arioui	Maître de Conférences, UEVE	Examinateur

Résumé : Le travail de thèse de Saidi concernait le développement de nouvelles stratégies de commande basées sur des techniques prédictives. Saidi a passé 3 stages,

d'une durée d'un mois à chaque fois, afin de tester ces approches basées sur des techniques *Generalized Pridictive Control (GPC)* sur des platesformes de restitution de mouvement.
Position actuelle : Maître de Conférences à l'Université d'Annaba, Algérie.
Communications : une publication dans une revue [26].

3.7.2.1 Récapitulatif

L'activité d'encadrement des thèses peut être résumée par le tableau suivant :

Thésards	Taux d'Encad.	Période	Soutenue	Conf. / Revues
Chabane Chenane	40%	Sept. 10-Déc. 13	En cours	0 / 0
Amine Khettat	25%	Oct. 09-Déc. 12	En cours	1 / 0
Hamid Slimi	50%	Sept. 07-Déc. 10	En cours	4 / 0
Lamri Nehaoua	90%	Fév. 05-Déc. 08	Oui	11 / 3
Mounir Saidi	40%	Avr.-Oct. 09	Oui	0 / 1
Hakim Mohellebi	SR	Jan. 03-Déc. 05	Oui	3 / 1

3.7.3 Encadrements de Master2 et d'Ingénieurs

– **Février 2010 - Juillet 2010**
Etudiant : Lounis Temzi
Intitulé du Master : Réalité Virtuelle et Systèmes Intelligents (RVSI), UEVE.
Sujet :*Téléopération de Robots Mobiles et reconstruction d'environnement à partir des données capteurs.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Encadrement : H. Arioui (100%).
Financement : Projet Européen CompanionAble.
Résumé : Dans le cadre de ce stage, le travail de recherche proposé au candidat est une suite naturelle des travaux initiés dans le cadre du Post-Doc de Z. Dai. Ce stage a pour but de finaliser la première partie du post-doc par la mise en place d'un protocole de communication, type client-serveur, pour la téléopération à distance du robot mobile suivie d'une batterie de tests avec des partenaires Espagnols dans le cadre du projet CompanionAble. En parallèle, le stagiaire a réalisé un travail remarquable sur la formalisation du problème et la modélisation de toute l'interaction haptique. Par ailleurs, nous travaillons en ce moment sur une approche pour la recontruction automatique d'un environnement distant en se basant sur les données capteurs et les différents modèles du robot mobile.

– **Février 2009 - Juillet 2009**
Etudiant : Karim Belharet
Intitulé du Master : Réalité Virtuelle et Systèmes Intelligents (RVSI), UEVE.
Sujet :*Modélisation d'un véhicule de deux roues par technique de Bond Graph et validation expérimentale.*
Laboratoire d'accueil : LEPSIS-LCPC, IBISC-CNRS Fre3190 & LAGIS-CNRS, Lille.
Encadrement : H. Arioui (40%), H. Imine (40%) et R. Merzouki (20%)

Financement : Contrat LCPC.
Résumé : Les conducteurs de véhicules deux-roues sont considérés comme les usagers les plus vulnérables de la route, en témoigne l'augmentation des accidents chaque année. De ce fait, les chercheurs commencent à recentrer leurs efforts sur ce type de véhicule pour la modélisation et le contrôle de leurs trajectoires, etc. Le travail du stage assuré par K. Belharet 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, K. Belharet est arrivé à nous fournir un modèle dynamique englobant les composantes longitudinales, latérales et roulis. La phase validation de ce modèle n'a pas été effectuée pour cause d'indisponibilité du simulateur de conduite moto, en cours de modification mécanique à cette période.
Position actuelle : Inscrit en thèse de doctorat au Laboratoire Vision et Robotique à (LVR) Bourges.

– **Février 2008 - Juin 2008**
Etudiant : Saber Ammer
Intitulé du Master : Réalité Virtuelle et Systèmes Intelligents (RVSI), UEVE.
Sujet :*Modélisation et commande d'un simulateur de conduite automobile muni de 2 degrés de liberté.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Encadrement : H. Arioui (100%)
Financement : Projet VIGISIM.
Résumé : Dans le cadre du projet PREDIT-ANR VIGISIM, j'ai confié à S. Ammer les modélisations cinématique et dynamique de la plate-forme de restitution de mouvements. Cette architecture consistait en deux degrés de liberté (mouvements longitudinale et latérale). D'une autre part, il a avait pour tâche la synthèse d'algorithmes de Washout classique afin de générer les meilleures trajectoires d'excitation de la mécanique.
Sur le volet technique, S. Ammer avait la responsabilité de la mise en marche de la plate-forme. Sa participation a été limité à quelques semaines du fait du retard dans la réalisation de la plate-forme.
Position actuelle : Doctorant au laboratoire LASMEA, Clermont Ferrand.

– **Février 2006 - Juin 2006**
Etudiant : Nadjib Debache
Intitulé du Master : Génie Electrique et Informatique Industrielles, UFR ST - UEVE.
Sujet : *Implémentation de lois de commande sur carte micro-contrôleur pour l'assistance à la conduite sur simulateur : Application à un retour d'effort sur le volant.*

Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190 & MSIS INRETS.
Encadrement : H. Arioui (50%), S. Espié (50%)
Financement : Contrat INRETS.
Résumé : L'intervention au sein du projet simulateur SIM^2 consiste à réaliser un module permettant de contrôler la réactivité d'un volant de la cabine de conduite en associant un retour actif sur ce dispositif impératif pour améliorer la présence au sein de l'environnement virtuel. L'idée principale est donc de restituer tous les effets inertiels qui peuvent se produire sur le volant tels que : dynamique de la chaîne de direction, effets du contact-pneu chaussée, etc.
Une deuxième mission lui a été confiée aussi où le but était l'étude de la faisabilité d'un siège vibrant suivant une texture prédéfinie de la chaussée. Pour des raisons de limitations de bande passante de la technologie utilisée, nous avons abandonné, plus tard, cet axe de recherche.
Position actuelle : Ingénieur chez Valeo.

– **Février 2005 - Septembre 2005**
Etudiant : Karim Tourbah
Intitulé du Master : Réalité Virtuelle et Maîtrise des Systèmes Complexes (RVMSC), UEVE.
Sujet : *Mise en place d'une application de rendu haptique collaboratif distribuée via le réseau.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Encadrement : H. Arioui (100%)
Financement : Réseau d'Excellence INTUITION.
Résumé : Cette thèse concerne l'étude des interactions haptiques collaboratives en utilisant des techniques de réalité virtuelle (RV) et le développement de technologies permettant la transmission de données multi-sensorielles (interfaces multimodales et hétérogènes).
Afin d'augmenter le déploiement de ce type d'applications, un défi important est à relever : Comment fournir une connexion appropriée entre les applications haptiques distribuées ? Les diverses données sensorielles (sonores, visuelles, tactiles, kinesthésiques) ainsi que les commandes doivent être envoyées de manière synchrone au travers du média de transfert. Par exemple, Internet est un moyen très adapté pour relier l'ensemble des différents sites à cause de sa popularité et de sa rentabilité par rapport à des communications dédiées. Par contre, plusieurs problèmes surgissent avec l'utilisation de ce média car les protocoles de communication utilisés sont indéterministes (retards variables et discrets). Même si ces protocoles sont les plus utilisés, ils ne sont pas conçus pour des applications temps-réel et par conséquent les transferts souffrent de retards, de pertes d'informations et de congestions de réseaux imprévisibles. Par conséquent, le but de ce stage était la mise en place d'une architecture de simulation haptique afin de répondre à ces exigences de manière à voir une application stable et intuitive. Ce travail a été valorisé par une communication dans une conférence internationale [14].
Position actuelle : Ingénieur de développement chez Cap Gemini.

– **Février 2002 - Septembre 2002**

Etudiant : Mounir Mana
Intitulé du Master : Réalité Virtuelle et Maîtrise des Systèmes Complexes (RVMSC), UEVE.
Sujet : *Implémentation de lois de commande prédictives pour la stabilisation du rendu haptique en présence de retard de transmission.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Encadrement : H. Arioui (50%), A. Kheddar (50%)
Résumé : Le stage réalisé par Mounir Mana consiste à implémenter des lois de commande sur un site réel, pour la stabilisation des interactions haptiques en présence de retard de transmission. Ces derniers peuvent être constants ou variables comme le cas d'Internet (une des applications a fait l'objet d'une connexion avec un serveur installé à l'université de Berlin en Allemagne). L'interface haptique utilisée est un PHANToM avec 3 degrés de liberté. Les lois de commande utilisées ont été développées dans le cadre de ma thèse où deux approches principales prédictives et passives ont été mise en œuvre [9]. Les tests de ces commandes ont été réalisés en interaction avec des environnements virtuels canoniques simples où les algorithmes de détection de collisions sont rapides.
Position actuelle : Ingénieur de développement dans une SSII.

– **Février 2000 - Septembre 2000**
Etudiant : Philippe Arramon (Ingénieur de l'IIE)
Sujet : *Exploitation du rendu haptique pour la visualisation de données volumiques.*
Laboratoire d'accueil : IBISC-CNRS Fre3190.
Encadrement : H. Arioui et A. Kheddar (90%), Jean-Louis Pajon (10%)
Financement : Institut Français du Pétrole (IFP).
Résumé : Pour ses études géodésiques, l'IFP utilise un nombre de logiciels d'analyse et d'interprétation de différents relevés et caractéristiques terrestres (sismiques, acoustiques, exploration pétrolière, etc.). Ces logiciels disposent de fonctionnalités permettant la visualisation sous une forme facilement interprétable de ces données. Or il s'avère que seule la modalité visuelle, pour le rendu de ces données, est insuffisante. Le but de ce stage a été l'ajout de la modalité haptique comme une composante complémentaire au rendu visuel.
Mon implication dans ce stage était limitée à la synthèse d'un contrôleur basé sur le principe du couplage virtuel et permettant l'atténuation des vibrations pour une bonne perception des champs de données.
Position actuelle : Ingénieur de développement chez Dassault Aviation.

3.7.4 Autres encadrements

Par ailleurs, j'ai participé régulièrement à des encadrements de groupe de projet, formés de 4 à 5 étudiants de Master1 Professionnel. Ces suivis ont été assurés dans le cadre des projets Etude Recherche et Développement (ERD) à l'UFR Sciences et Technologies.

3.8 Séminaires, communications et autres manifestations

3.8.1 Séminaires

Dans les cinq dernières années, la question de l'évaluation par les tutelles des enseignants-chercheurs se posait constamment ainsi sur que les outils et indices bibliographiques pertinents. Depuis le début de mes travaux de recherche, j'avais le souci constant de valoriser et valider mes résultats de recherche et de les confronter à la communauté scientifique par le biais des communications. J'ai donc participé à plusieurs manifestations scientifiques en tant que conférencier ou invité :

- Colloques internationaux : présentations des communications [9], [42], [43], [34], [21], [19], etc.
- Colloque nationaux : présentation de communications aux Journées de Jeunes Chercheurs en Robotique [46] ainsi qu'au Journées Nationales sur la Recherche en Robotique [44].
- Présentation d'un article invité à *International Conference on Control Modelling and Diagnostic* [47]. (voir liste publications)
- Séminaire : présentation des travaux sur la stabilisation du rendu haptique en présence de retard [48], Groupe de travail sur les Systèmes à Retard (GDR MACS).
- Séminaire : présentation des travaux sur le rendu haptique et applications, séminaire interne Génopole [49].
- Diverses présentations internes au laboratoire IBISC.

3.8.2 Organisation des manifestations

Par ailleurs, je suis initiateur de la *Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA)* et actuellement président du *Steering Committee*. Cette conférence a pour but de donner aux chercheurs, en particulier du bassin méditerranéen mais aussi ceux du monde entier, l'opportunité de discuter sur les défis de la recherche scientifique en robotique et l'automation, de renforcer les collaborations bilatérales, ainsi que de partager les opinions sur les nouvelles directions et actions à mener pour relancer la recherche dans les pays du sud. La conférence CISA, se veut périodique avec une fréquence d'une fois par an. Le succès des deux premières éditions est manifeste et se traduit par une participation importante de chercheurs venant des quatre coins du monde.

- Participations à l'organisation de la conférence CISA 2009 qui s'est déroulée à Zarzis en Tunisie, Mars 2009.
- Chairman de la 1st Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA'08) qui s'est déroulée du 30 juin au 02 juillet à Annaba en Algérie. 231 papiers reçus et 92 acceptés de chercheurs venant 18 pays différents. Site de la première édition : `http://lsc.univ-evry.fr/cisa08/doku.php`
- Participation à l'organisation de la conférence EuroHaptics 2006 qui s'est déroulée à Paris en Juin 2006.
- Participation à l'organisation des Journées des Jeunes Chercheurs en Robotiques, 2001 qui s'est déroulée à Evry en Juin 2001.

3.9 Rayonnement

3.9.1 Invitation et sélection

- **2009**, Chairman dans une session "Assistive Robotics III" au *International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'09), Japon, Septembre 27 - Octobre 2, 2009*.
- **2006**, Conférencier invité en session plénière durant *International Conference on Control Modelling and Diagnostic, (ICCMD'06)), Annaba, Algérie, Mai 22-24 2006*, sur invitation du comité d'organisation.
- **2005**, Sélection du papier [17] parmi les meilleurs papiers de la *5th International Conference on Machine Automation, (ICMA'04)* et sa publication [47] en tant que chapitre de livre ayant pour titre : *Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era*, édition de *Elsevier Science and Technology Books*.
- **2005**, H. Arioui, "Réalité virtuelle et rendu haptique", Séminaire interne de Génopole-Recherche, Evry, France, 25 mars 2005, invité par le comité d'organisation.
- **2004**, H. Arioui, "Stabilisation d'un système de téléopération en présence de retard de transmission par des méthodes prédictives", *Journées Systèmes à Retard (SAR'04), Paris, France, 18 March, 2004*, Invité par P-A Bliman (comité d'organisation).

3.9.2 Jury de thèse

- **2008 :**
  Etudiant : M. Lamri Nehaoua **Titre :** Docteur de l'Université d'Evry Val d'Essonne **Sujet :** Conception et réalisation d'une plate-forme mécatronique dédiée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues motorisés. **Rôle :** Examinateur et responsable scientifique **Date de soutenance :** 10 décembre 2009.
- **2007 :**
  Etudiant : M. Adel Merabet **Titre :** Docteur de l'Université du Québec à Chicoutimi **Sujet :** Commande non-linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone **Rôle :** Rapporteur **Date de soutenance :** 27 mai 2007.
- **2006 :**
  Etudiant : M. Mohamed Larbi Saidi **Titre :** Docteur de l'Université d'Annaba **Sujet :** Implémentation de lois de commande prédictives pour le contrôle des plates-formes à restitution de mouvement. **Rôle :** Examinateur **Date de soutenance :** 02 juillet 2006.

3.9.3 Activités de relecture

Lecteur pour les revues :
- IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **2008, 2009, 2010**.
- IEEE Transactions on Vehicular Technology, **2007, 2008, 2010**.
- Journal of Intelligent Robotics and Systems, Springer, régulièrement depuis **2003**.

Lecteur pour des congrès internationaux :
- IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), **2010**.
- IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), **2009**.
- IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), **2009**.

- Mediterranean Conference on Intelligent System and Automation (CISA), depuis **2008**.
- IEEE European Control Conference (ECC), **2007**.
- EUROHAPTICS et WORLDHAPTICS, **2006, 2010**.
- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), **2006, 2008, 2009**.
- IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), **2005, 2007**.
- IEEE Conference on Decision and Control (CDC), **2005**.
- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), **2004, 2006-2008, 2011**.
- IEEE Multi-Conferences on Control (ICCA, ISIC), **2003, 2006, 2008**.
- IEEE Robot and Human Interactive Communication (ROMAN), **2003, 2008, 2009**.
- IFAC World Congress. **2002, 2008**.
- IEEE/ASME American Control Conference (ACC), régulièrement depuis **2002**.

Liste des publications

4

Sommaire

4.1 Liste des publications 47
4.1.1 Revues Internationales avec comité de sélection 47
4.1.2 Livres et chapitres de livre 47
4.1.3 Conférences internationales avec actes 48
4.1.4 Conférences nationales avec actes et séminaires 50
4.1.5 Rapports de recherche 50
4.1.6 Publications soumises ou en cours de révision 51

- 5 articles dans des revues internationales
- 2 articles de revue en cours de révision
- 1 chapitre de livre, rédigé en français, dans un ouvrage multi-auteurs édité, collection IC2 Hermès
- 2 chapitres de livre, rédigés en anglais, dans 2 ouvrages multi-auteurs édités, collections : Wiley/ISTE et Elsevier
- 1 édition d'actes de conférence
- 3 rapports de recherche
- 1 article de conférence invité
- 34 articles dans des congrès internationaux et nationaux avec comité de lecture et publication des actes

4.1 Liste des publications

4.1.1 Revues Internationales avec comité de sélection

1. **H. Arioui**, L. Nehaoua, R. Bertin et S. Espié, " From Design to Experiments of a 2 DOF Vehicle Driving Simulator ", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Apparaître 2011.
2. **H. Arioui**, L. Nehaoua, S. Hima, N. Séguy et S. Espié, " Mechatronics, Design and Modeling of a Motorcycle Riding Simulator ", IEEE Transactions on Mechatronics. Octobre 2010, volume 15, issue 5, pages 805-818.
3. L. Nehaoua, H. Mohellebi, **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Espié, " Design and Control of a Minimum-Clearance Driving Simulator ", IEEE Transactions on Vehicular Technology, March 2008, volume 57, issue 2, pages 736-746.
4. M.L. Saidi, **H. Arioui** et H. A. Abbassi, " Predictive Control of Motion Platform in Driving Simulator ", Journal of Information Technology, June 2006, volume 5, number 2, pages 133-138.
5. **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Mammar, " A Model Based Controller for Interactive Force Reflecting Virtual Environment under Time Delay ", Journal of Intelligent and Robotic Systems -Theory and Applications-, June 2003, volume 37, number 2, pages 193-207.

4.1.2 Livres et chapitres de livre

6. **H. Arioui**, " Effect of Transmission Delay on Haptic Perception in Shared Virtual Environments", Chapitre de livre dans : " End-to-End Quality of Service Engineering in Next Generation Heterogeneous Networks ", Edition ISTE/Wiley, Novembre 2008, chapitre n°17, pages 435-448. ISBN : 9781848210615.
7. **H. Arioui**, R. Merzouki et H. A. Abbassi, " Intelligent Systems and Automation ", Series : AIP Conference Proceedings, Vol. 1019, July 2008. ISBN : 9780735405400.
8. **H. Arioui**, " Impact des Réseaux de Communication sur la Perception Haptique en Réalité Virtuelle", Chapitre de livre dans : " Mécanismes du contrôle de la qualité de service : applications temps réel et multimédia ", Traité IC2, série traitement du signal et de l'image, Edition Hermès, Mars 2007, chapitre n°10, pages 289-303. ISBN : 9782746214880.
9. H. Mohellebi, S. Espié, A. Kheddar, **H. Arioui**, " Design of low-clearance motion platform for driving simulator ", Chapitre de livre dans : " Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era ", Edition Elsevier Science and Technology Books, October 2006, chapitre n°4, pages 401-405. ISBN : 9780080449630.

4.1.3 Conférences internationales avec actes

10. L. Nehaoua, **H. Arioui**, A. Khettat et H. Imine, " Rider Steer Torque Estimation for Motorcycle Riding Simulator ", 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Cambridge Massachusetts, USA, September 13-15, 2010, pp 505-510.
11. A. Merabet, **H. Arioui**, " Robust Cascaded Feedback Linearizing Control of Nonholonomic Mobile Robot ", IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'10), May 2-5, 2010, Calgary, Alberta, Canada.
12. H. Slimi, **H. Arioui**, L. Nouveliere et S. Mammar, " Motorcycle Speed Profile in Cornering Situation ", American Control Conference (ACC'10), Baltimore, Maryland, USA, 30 June - 02 July, 2010, pp 1172-1177.
13. H. Slimi, **H. Arioui**, S. Mammar et L. Nouvelière, " Advanced Motorcycle-Infrastructure-Driver Roll Angle Profile for Loss Control Prevention ", 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'09), St. Louis, USA, October 3-7, 2009, pp 1-6.
14. **H. Arioui**, " Modeling and Identification of 2 DOF Low Cost Driving Simulator : Experimental Results ", 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'09), Toyama, Japan, Septembre 27 - Octobre 2, 2009, pp 1162-1167.
15. **H. Arioui** et S. Hima, " 2 DOF Low Cost Platform for Driving Simulator : Design and Modeling ", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'09), Singapore, July 14-17 2009, pp 1206-1211.
16. H. Slimi, **H. Arioui**, L. Nouveliere et S. Mammar, " Preventive Safety : Warning System for Control Loss of Two-Wheeled Vehicles ", 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation 2009 (CISA'09), Djerba, Tunisia, March 23-25 2009.
17. L. Nehaoua, **H. Arioui**, S. Hima et N. Séguy, " A New Motorcycle Simulator Platform : Mechatronics Design, Dynamics Modeling and Control ", 17th IFAC World Congress 2008 (WC'08), Seoul, South Korea, July 06-11 2008, pp 4452-4457.
18. S. Hima, L. Nehaoua, N. Séguy et **H. Arioui**, " Suitable Two Wheeled Vehicle Dynamics Synthesis for Interactive Motorcycle Simulator ", 17th IFAC World Congress 2008 (WC'08), Seoul, South Korea, July 06-11 2008, pp 96-101.
19. L. Nehaoua et **H. Arioui**, " Parameters Identification for Motorcycle Simulator's Platform Characterization ", 1st Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation 2008 (CISA'08), Annaba, Algeria, June 30 - July 02 2008, pp 133-138.
20. S. Hima et **H. Arioui**, " Two Wheeled Vehicle Dynamics Synthesis for Real-Time Applications ", 1st Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation 2008 (CISA'08), Annaba, Algeria, June 30 - July 02 2008, pp 47-52.
21. A. Merabet, **H. Arioui** et M. Ouhrouche, " Cascaded Predictive Controller design for speed control and Load Torque rejection of Induction Motor ", American Control Conference (ACC'08), Seattle, Washington, USA, 11-13 June 2008, pp 1139-1144.
22. S. Hima, L. Nehaoua, N. Séguy et **H. Arioui**, " Motorcycle Dynamic Model Synthesis for Two Wheeled Driving Simulator ", 10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'07), Seattle, USA, 1-5 October 2007, pp 617-622.

23. L. Nehaoua, **H. Arioui**, N. Séguy et S. Espié, " Design and Modeling of a New Motorcycle Riding Simulator ", American Control Conference (ACC'07), New York, NY, USA, 11-13 July 2007, pp 5594-5599.
24. L. Nehaoua, **H. Arioui**, N. Séguy et S. Espié, " Open-Loop Tests and Validation of a New Two-Wheeled Vehicle Riding Simulator ", European Control Conference (ECC'07), Kos, Greece, 02-04 July 2007, pp 4911-4916.
25. L. Nehaoua, **H. Arioui**, S. Hima et N. Séguy, " Two-Wheeled Vehicle Driving Simulator : Design and Actuation ", IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV'07), Istanbul, Turkey, 13-15 June 2007.
26. K. Tourbah, **H. Arioui**, N. Séguy, A. Kheddar, " Collaborative Haptic Simulation ", IEEE Conference on Control Application (ICCA'06), Munich, Allemagne, 15-19 October 2006, pp 46-51.
27. L. Nehaoua, **H. Arioui**, H. Mohellebi et S. Espié, " Restitution Movement for a Low Cost Driving Simulator ", American Control Conference (ACC'06), Minnesota, USA, 05-08 June 2006, pp 2599-2604.
28. L. Nehaoua, **H. Arioui**, H. Mohellebi et S. Espié, " Motion Cueing Algorithms for Small Driving Simulator ", International Conference on Robotics and Automation (ICRA'06), Orlondo, USA, 15-19 May 2006, pp 3189-3194.
29. **H. Arioui**, " Haptic Interaction : Progress and Challenge ", Papier invité à International Conférence on Control Modelling and Diagnostic (ICCMD'06)), Annaba, Algérie, 22-24 May 2006.
30. **H. Arioui**, L. Nehaoua et A. Amouri, " Classic and Adaptive Washout Comparison for a Low Cost Driving Simulator " 13th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'05), Limassol, Chypre, 27-29 June 2005, pp 586-591.
31. H. Mohellebi, S. Espié, **H. Arioui**, A. Amouri et A. Kheddar, " Low cost motion platform for driving simulator " 5th International Conference on Machine Automation, (ICMA'04), Osaka, Japan, 24-26 November 2004, pp 271-277.
32. **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Mammar, " A Robustness Analysis of Master-Model Based controller for stabilizing delayed haptic interaction : An LMI Approach ", 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'03), Lisbon, Portugal, June 30 - July 3, 2003, pp 1449-1455.
33. **H. Arioui**, " A Passive Wave-Based Approach under Time Varying Delay ", 4th IEEE International Conference on Control and Application (ICCA'03), June 10-12, 2003, Montreal, Canada, pp 163-168.
34. **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Mammar, " A Predictive Wave-Based Approach for Time Delayed Virtual Environment Haptics Systems ", 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'02), Berlin, Germany, 25-27 September 2002, pp 134-139.
35. **H. Arioui**, M. Mana, A. Kheddar et S. Mammar, " Master-Model Based Time-delayed Force Feedback Interaction : Experimental Results ", 17th IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC'02), Vancouver, British Columbia, Canada, 23-30 October 2002, pp 896-901.
36. **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Mammar, " Stable shared virtual environment haptic interaction under time-varying delay ", 8th IEEE Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR'02), Szczecin, Poland, 2-5 September 2002, pp 1145-1150.

37. **H. Arioui**, A. Kheddar et S. Mammar, " A Master Model-Based Stable Time-Delayed Force Feedback Interaction ", 10th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'02), Lisbon, Portugal, 9-12 July 2002, pp 233-241.
38. **H. Arioui**, S, Mammar et T. Hamel, " A Smith-prediction based Haptic Feedback Controller for Time Delayed Virtual Environments Systems ", American Control Conference (ACC'02), Alaska, USA, 8-12 May 2002, pp 4303-4308.

4.1.4 Conférences nationales avec actes et séminaires

39. H. Slimi, **H. Arioui**, L. Nouveliere et S. Mammar, " Dynamique critique des véhicules à deux roues motorisés : Modélisation et stabilisation LQG du mouvement de roulis", MajecSTIC, Avignon France, 16-18 Novembre 2010.
40. H. Slimi, **H. Arioui**, S. Mammar et L. Nouvelière, " Système de Génération d'Alertes pour la Perte de Contrôle de Véhicules à deux Roues Motorisés", Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'09), Sologne, France, Novembre 3-6, 2009.
41. **H. Arioui**, " Réalité virtuelle et rendu haptique ", Séminaire interne de Genopole-Recherche, Evry, France, 25 mars 2005.
42. **H. Arioui**, " Stabilisation d'un système de téléopération en présence de retard de transmission par des méthodes prédictives", Journées Systèmes à Retard (SAR'04), Paris, France, 18 March, 2004.
43. **H. Arioui**, " Téléopération avec retour d'effort en présence de retard de transmission : commande et analyse de stabilité", 14me Journées Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'01), Evry, France, 31 May - 01 June 2001, pp 48-53.

4.1.5 Rapports de recherche

44. **H. Arioui**, L. Nehaoua, S. Hima et N. Séguy, " Simulateur de détection des Altérations du comportement de conduite liées à l'attention et à la Vigilance : Sélection de mouvement, conception et modélisation du simulateur VIGISIM" , Rapport interne, Projet Predit-ANR VIGISIM. Janvier 2007.
45. **H. Arioui**, L. Nehaoua, S. Hima et N. Séguy, " SIMulateur pour l'Apprentissage de la COnduite de 2 roues Motorisés : Modélisation dynamique de véhicules de deux roues", Rapport interne, Projet Predit-ANR SIMACOM. Décembre 2006.
46. **H. Arioui** et A. Kheddar, " Contrat INTUITION IST-NMP-1-507248, WP1.A.2 State of the art and literature review on Virtual Reality over the World", Network of Excellence (NoE) INTUITION Virtual Reality, April 2006.

4.1.6 Publications soumises ou en cours de révision

47. L. Nehaoua, **H. Arioui** et H. Imine, " Sliding mode Observer for Rider Steering Torque Reconstruction on Motorcycle Simulator", Soumis à IEEE Transactions on Vehicular Technology.
48. **H. Arioui** et Ph. Hoppenot, " Haptic Teleoperation of Nonholomic Mobile Robot ", En révision à Journal of Intelligent and Robotic Systems -Theory and Applications-.
49. S. Hima, **H. Arioui** et N. Séguy, " Two Wheeled Vehicle Dynamics Modeling for Real-Time Applications ", En révision à Journal of Vehicle Systems Dynamics.
50. L. Nehaoua et **H. Arioui**, " Mechatronics of Driving Simulator", Chapitre de livre dans : " Mechatronic & Innovative Applications ", Editeurs : R. Merzouki et Arun Kumar Samantaray, Edition Bentham Science Publishers, en cours de révision.
51. **H. Arioui** and Ph. Hoppenot, " Remote Control of an Assistive Robot using Force Feedback ", Soumis à 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), EPFL, Lausanne, Switzerland, February 6 - 8, 2011.
52. **H. Arioui** and Ph. Hoppenot, " Force Feedback Stabilization for Remote Control of An Assistive Mobile Robot", Soumis à American Control Conference, San Francisco, California, USA, June 29 - July 1.
53. H. Slimi, **H. Arioui**, et S. Mammar, " Motorcycle Highest Safe Speed in Cornering Situation ", Soumis à IFAC World Congress 2011, Milan, Italy.
54. H. Slimi, **H. Arioui** et S. Mammar, " Motorcycle Lateral Dynamic Estimation and Lateral Tire-Road Forces Reconstruction Using Sliding Mode Observer ", Soumis à American Control Conference, San Francisco, California, USA, June 29 - July 1.

5 Synthèse des activités d'enseignement et des responsabilités pédagogiques et administratives

Sommaire

5.1 Responsabilités pédagogiques et activités administratives 55
5.1.1 Représentations 55
5.1.2 Responsabilité des stages professionnels 55
5.1.3 Responsabilité des Emplois du Temps 56
5.1.4 Responsabilité du laboratoire d'électronique 56
5.1.5 Responsabilité de modules d'enseignement 56
5.1.6 Proposition et encadrement de stages 57
5.2 Activités d'enseignement 58
5.2.1 Responsabilité de modules 58
5.2.2 Modules enseignés à l'UFR ST de l'UEVE par année 58
5.2.3 Ecoles d'ingénieurs et autres universités 60

5.1 Responsabilités pédagogiques et activités administratives

Depuis mon recrutement en septembre 2003, j'ai porté une attention particulière à la conciliation entre les activités d'administration et celles d'enseignement et de recherche. J'ai donc pris diverses responsabilités au sein de l'UFR ST et au niveau de quelques instances de l'université.

Sur le plan des responsabilités pédagogiques, j'ai assuré la responsabilité de plusieurs modules d'enseignement pour différents parcours. Par ailleurs, j'ai mené des actions de valorisation des formations de l'UFR auprès des laboratoires de recherche et des industriels en facilitant le placement et l'insertion des étudiants en stage.

Mes responsabilités administratives au sein de l'UFR Sciences et Technologies sont les suivantes :

- La responsabilité des stages professionnels de Maîtrise (Master 1) et DESS (Master2) à l'UFR Sciences et Technologies de l'Université d'Evry Val d'Essonne (2003-2006). J'ai pris cette responsabilité dès le début de mon recrutement en septembre 2003.
- La responsabilité des emplois du temps de toutes les filières de l'UFR Sciences et Technologies, sauf les parcours spéciaux (CFA, FC, etc.)
- La responsabilité du laboratoire d'électronique (2003-2005).
- La responsabilité de 6 modules d'enseignement en Licence3, Master1 professionnel, Licence de Technologie (LTEC), formation continue (FC) et par apprentissage (CFA).

5.1.1 Représentations

- Membre élu de la commission de spécialistes des sections 61 et 63 de l'université d'Evry Val d'Essonne, 2004-2009.
- Membre titulaire de la commission de spécialistes des sections 61 et 63 de l'Université d'Orsay, 2006-2008.
- Membre du vivier de spécialistes externes dans les sections 61 et 63 de l'Université de Créteil, depuis 2009.
- Membre Conseil Scientifique de l'Université d'Evry, depuis 2007.
- Membre élu au Conseil d'administration de l'UFR Sciences et Technologie (désistement en faveur de C. Vasiljivich).

5.1.2 Responsabilité des stages professionnels

Dès mon recrutement en septembre 2003, la direction de l'UFR m'a confié la lourde tâche du suivi de stage des étudiants en Maîtrise (Master1) et DESS (Master2).

L'objectif général des stages professionnels est de promouvoir le développement des expériences professionnelles requises au travail dans divers milieux (entreprises ou laboratoires) et de permettre au stagiaire de développer une analyse critique et synthèse digne d'un ingénieur. En plus des connaissances académiques acquises au sein de l'UFR, l'immersion dans le monde professionnel comprenant non seulement de nombreux projets effectués en groupe à l'université mais aussi des stages de 6 mois en entreprise est une façon différente d'aborder les études supérieures en permettant l'acquisition de connaissances de terrain, de comportements ou savoir être.

Afin de permettre une insertion rapide et une évolution de carrière aux étudiants, j'ai mis en place un système de suivi assez complet, à savoir :

- deux réunions d'information avant les stages : préparation des CV, éléments importants pour un entretien en entreprise, etc.
- une présentation de suivi de stage au milieu de la période, afin de déceler tout type de dysfonctionnements. Cette journée se fait en groupe d'étudiants ayant des problématiques semblables afin d'encourager les discussions et échanger les idées.
- mise en place d'un site internet pour l'orientation et l'aide au choix du stage en publiant les offres de stages reçues via différents canaux.
- visite en entreprise pour s'enquérir de la situation de l'étudiant ainsi que son intégration dans son nouveau milieu.
- mise en place d'un site internet pour la gestion des soutenances, la lecture des rapports et la gestion des jurys de stages.

Par ailleurs et durant les deux premières années (avant la mise en place du système LMD), je gérais plus de 270 étudiants confondus entre Maîtrise et DESS. Cette tâche était extrêmement lourde et difficile à gérer du fait de la multitude des imprévus, contacts (mails ou téléphoniques), visites des étudiants qui surgissent quotidiennement. Cette responsabilité a impacté mes travaux de recherche et j'ai opté donc, durant la troisième année, pour le partage avec un autre collègue.

5.1.3 Responsabilité des Emplois du Temps

Depuis le début de l'année universitaire 2005-2006 et ce pendant deux années, j'ai pris la coresponsabilité de l'établissement des emplois du temps pour l'ensemble des filières de formation initiale de l'UFR, à savoir GM, GEII et GSI tout niveau confondu Licence et les Master. Avec mon collègue N. Séguy, nous avions le souci constant de réorganiser l'emploi du temps de façon à respecter le maximum de contraintes posées par le personnel d'un coté et les exigences pédagogiques de l'autre coté.

5.1.4 Responsabilité du laboratoire d'électronique

Du fait d'une UFR qui n'a cessé de monter en puissance, quelques filières ont vues le jour et le nombre d'étudiants a été croissant. La gestion de laboratoire d'Electronique du département Génie Electrique est devenue fastidieuse et a demandé l'engagement d'un personnel enseignant, ce que j'ai accepté. Les activités du laboratoire d'électronique sont diverses et concernent principalement la préparation de l'ensemble des travaux pratiques dispensés dans les filières GEII, GSI ainsi qu'à la préparation des CAPET. Aussi, nous avons donné main forte aux laboratoires du campus afin de les aides dans l'accomplissement et la réalisation de leur interfaces et câblage électronique.

Par ailleurs et avec l'aide précieuse de mon collègue A. Amouri, nous avons mis en place deux salles de TP complètement équipées pour les modules d'Electrotechnique. Elles regroupent chacune douze postes de travail sur ordinateur.

5.1.5 Responsabilité de modules d'enseignement

A ce jour, je suis responsable de 6 modules d'enseignement aussi bien en formation initiale IUP, formation continue (FC) et par apprentissage (CFA). Ces modules représentent un volume horaire total de 66h de cours magistraux, 110h de travaux dirigés et 140h de travaux pratiques. Ce volume varie chaque année en fonction du nombre des groupes

d'étudiants inscrits. Pour la gestion de ces modules, je fais appel à 5 collègues qui peuvent être enseignants, doctorants ou ATER.

5.1.6 Proposition et encadrement de stages

Dans le cadre des mes activités d'enseignement, j'ai proposé et encadré plusieurs projets de formation dans diverses thématiques. Ces projets concernent la modélisation de systèmes complexes, conception virtuelle des systèmes (VRML), asservissement et algorithmes de restitution de mouvements, etc. Quelques projets sont cités ci-dessous :

- **2008-2009** : Dimensionnement et asservissement de moteur à courant continu pour une application de simulation de conduite.
- **2006-2007** : Modélisation, conception virtuelle et commande d'un simulateur de conduite à 2DLL.
- **2005-2006** : Modélisation et conception d'un système pour la vibration de siège automobile.
- **2004-2005** : Conception de deux sites internet pour la gestion des stages et la gestion des notes à l'IUP.

5.2 Activités d'enseignement

Mes activités d'enseignement s'effectuent principalement à l'UFR Sciences et Technologies de l'université d'Evry Val d'Essonne. Cette unité de formation et de recherche regroupe les trois filières d'IUP : génie électrique et informatique industrielle (GEII), génie des systèmes industriels (GSI) et génie mécanique (GM). Les étudiants de l'IUP peuvent accéder aux Master1, après trois années de Licence dont la dernière année (L3) à l'IUP. A ces filières s'est ajoutée depuis 2000 la licence professionnelle. Mes responsabilités de modules et mes interventions concernent l'ensemble de ces formations avec une proportion plus importante pour le niveau du Master. Durant mes années de service, j'ai effectué un service moyen de 300H équivalent TD (41CM, 120TD et 180TP).

J'interviens par ailleurs à l'école supérieure d'InformaTique, réseaux et systèmes d'INformation (ITIN). J'ai assuré aussi des interventions à l'Ecole Française d'Electronique et d'Informatique (EFREI) et à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Informatique et Génie des Télécommunications (ESIGETEL).

5.2.1 Responsabilité de modules

5.2.1.1 Université d'Evry, UFR Sciences et Technologies

- **2005-2009 et 2010-2011**, Asservissements linéaires (AU01) : licence professionnelle. Equipe pédagogique formée de 4 intervanants aux maximum. Le nombre d'étudiants fluctue, d'une année à une autre, entre 20 à 36.
- **2006-2009**, Modélisation et Technologie (MT71) : algèbre matricielle, Master IUP GEII et GSI. L'équipe pédagogique est formée de 2 intervenants pour un groupe de 24 d'étudiants, en moyenne.
- **2004-à ce jour**, Génie Informatique (GI53) : automatisme et notions d'asservissement, licence IUP GM. L'équipe pédagogique est formée de 2 intervenants pour un groupe de 20 d'étudiants, en moyenne.
- **2004-à ce jour**, Signaux et Systèmes : notions, transformée de Laplace et représentations, licence CFA/FC GSI. L'équipe pédagogique est formée de 2 intervenants pour un groupe de 15 d'apprentis CFA.
- 2004-à ce jour, Asservissement linéaire : Master1 CFA/FC GSI. L'équipe pédagogique est formée de 2 intervenants pour un groupe de 15 d'apprentis CFA.
- **2004-à ce jour**, Filtrage : Master1 M1 CFA/FC GSI. L'équipe pédagogique est formée de 2 intervenants pour un groupe de 15 d'apprentis CFA.

5.2.1.2 Ecole supérieure d'InformaTique, réseaux et systèmes d'INformation

- Interfaçage haptique : interaction avec les environnements virtuels, automatique du rendu haptique, principes des détections de collisions et dynamiques des objets virtuels. Ce module s'est en collaboration avec Mr. Nicolas Séguy et il est destiné aux élèves ingénieurs de 2me année. Le nombre d'élèves est de 20, en moyenne.

5.2.2 Modules enseignés à l'UFR ST de l'UEVE par année

Comme déjà signalé, mes interventions ont concernés l'ensemble des niveaux (Licence et Master) pour les filières de GEEI, GSI et GM. Aussi, je me suis investi dans d'autres

formations telles que la Licence Professionnelle, la Formation Continue (FC) et la Formation par Apprentissage (CFA). Les pourcentages suivants(moyenne de mes interventions depuis 2003) illustrent la répartition des enseignements par niveau et par type (cours, travaux dirigés ou travaux pratiques).

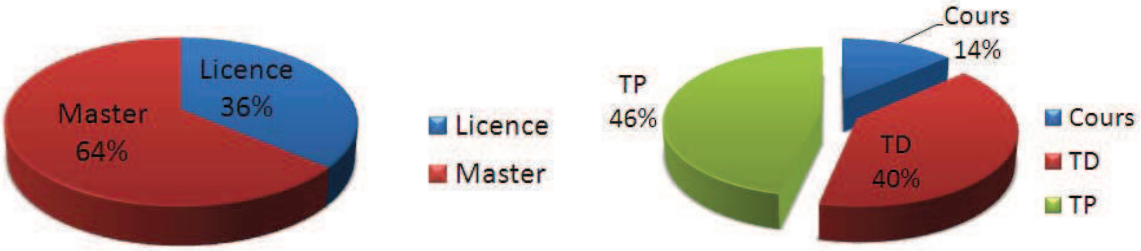

FIGURE 5.1 – *Pourcentage des enseignements donnés par niveau et par type.*

1 – **Année Universitaire 2009-2010** : Maître de conférences (1er *semestre passé en CRCT*)
- ◇ Signaux et Systèmes, responsable du module (*Cours 10h, TD 10h et 32h TP*) : Définition des signaux et des propriétés des systèmes, transformée de Laplace, fonction de transfert, étude des systèmes élémentaires, représentation de système. Cet enseignement est destiné aux étudiants de la *licence GSI Centre de Formation par Alternance (CFA)*.
- ◇ Asservissement analogique, responsable du module (*Cours 10h, TD 10h*) : structure d'un système asservi, analyse des performances, fonction et lieu de transfert. Les étudiants concernés sont ceux du *Master1 GSI en Formation Continue et CFA*.

2 – **Année Universitaire 2008-2009** : Maître de conférences
- ◇ Modélisation et Technologies, responsable du module (*Cours 21h, TD 21h*) : rappels généraux sur les matrices, valeurs et vecteurs propres, propriétés de matrices et les différentes décompositions permettant la solution simple d'un système d'équations. Cet enseignement est destiné aux étudiants de *Master1 IUP GSI et GEII*.
- ◇ Méthodes Numériques (*TP 16h*) : Initiation au logiciel Matlab, résolution des équations linéaires (méthodes pivot et méthodes itératives), résolution des équations et systèmes d'équations non-linéaires, interpolation et extrapolation, méthodes moindres carrées, introduction aux techniques d'optimisation, résolution numérique des équations différentielles. Cet enseignement est destiné aux étudiants de *Master1 IUP GSI et GEII*.
- ◇ Traitement statistique du signal (*TD 10.5, TP 16h*) : Maîtrise de la notion de signal réel et aléatoire, connaître les techniques de filtrage statistique (Kalman, prédiction, etc.), représentation spectrale, estimation. Cet enseignement est destiné aux étudiants de *Master1 IUP GSI*.
- ◇ Filtrage, responsable du module (*Cours 10h, TD 10h*) : définition du filtrage analogique et numérique, rappels sur les signaux et filtres, transformée de Fourrier, filtrage harmonique, normalisation, gabarit de filtre, synthèse des filtres passifs, prototypage de filtres (Butterworth, Tchybetcheff, etc.). Cet enseignement est destiné aux étudiants de *Master1 GSI FC/CFA*.
- ◇ Signaux et Systèmes, responsable du module (*Cours 25h, TD 25h et 40h TP*) : Définition des signaux et des propriétés des systèmes, transformée de Laplace, fonction de transfert, étude des systèmes élémentaires, représentation de système. Cet ensei-

gnement est destiné aux étudiants de la *licence GSI Centre de Formation par Alternance (CFA), la licence professionnelle et la licence Génie Mécanique*.
   - ◇ Asservissement analogique (voir descriptif ci-dessus).

3 – **Année Universitaire 2007-2008** : Maître de conférences
   - ◇ Modélisation et Technologies.
   - ◇ Méthodes Numériques.
   - ◇ Traitement statistique du signal.
   - ◇ Filtrage.
   - ◇ Signaux et Systèmes.
   - ◇ Asservissement analogique.

4 – **Année Universitaire 2006-2007** : Maître de conférences
   - ◇ Modélisation et Technologies.
   - ◇ Méthodes Numériques.
   - ◇ Traitement statistique du signal.
   - ◇ Signaux et Systèmes.
   - ◇ Asservissement analogique.

5 – **Année Universitaire 2005-2006** : Maître de conférences
   - ◇ Fonctions d'Electronique (*TD 16.5h*) : généralités sur les circuits (dipôles, lois de Kirchoff, association d'éléments, etc.), régime sinusoïdal, théorèmes généraux (superposition, paramètres de quadripôle, impédances d'entrée/sortie, etc.), circuits (RC, RL et RCL), diodes et application et amplification. Cet enseignement est destiné aux étudiants de *DEUG IUP GEII/GSI*.
   - ◇ Méthodes Numériques.
   - ◇ Traitement statistique du signal.
   - ◇ Signaux et Systèmes.
   - ◇ Asservissement analogique.

6 – **Année Universitaire 2004-2005** : Maître de conférences
   - ◇ Modélisation et Technologies.
   - ◇ Fonctions d'Electronique.
   - ◇ Méthodes Numériques.
   - ◇ Traitement statistique du signal.
   - ◇ Signaux et Systèmes.
   - ◇ Asservissement analogique.

7 – **Année Universitaire 2003-2004** : Maître de conférences
   - ◇ Modélisation et Technologies.
   - ◇ Fonctions d'Electronique.
   - ◇ Méthodes Numériques.
   - ◇ Traitement statistique du signal.
   - ◇ Signaux et Systèmes.
   - ◇ Asservissement analogique.

5.2.3 Ecoles d'ingénieurs et autres universités

- **2006 - 2009 : Ecole supérieure d'InformaTique, réseaux et systèmes d'INformation (ITIN)**. En tant que responsable du module, j'ai assuré des cours sur l'Interfaçage Haptique en Réalité Virtuelle dont le volume est de *Cours/TP 28h*). Le cours concernait Introduction à l'haptique, Commande des dispositifs à retour haptique, Notions

fondamentales pour l'haptique, Introduction sur les moteurs physiques. Les 20 étudiants concernés sont des *élèves ingénieurs en* 3me *année*.

- **2003 - 2004 : Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Informatique et Génie des Télécommunications -ESIGETEL-**. En tant que vacataire, j'ai assuré des séances de travaux pratiques sur le filtrage numérique, modulation /démodulation (d'amplitude et fréquentielle) pour des *élèves ingénieurs de deuxième année*.
- **2003 - 2005 : Ecole Française d'Electronique et d'Informatique -EFREI-**. A titre d'intervenant externe, j'ai assuré 6 séances de travaux dirigés (TD) sur les systèmes combinatoire, logique combinatoire, automatisme, etc. Cet enseignement concernait des *élèves ingénieurs de première année*. Le groupe est fromé de 15 élèves.
- **2007 - 2008 : Université d'Annaba, Algérie**. J'ai assuré ce module en tant qu'enseignant invité. L'enseignement concernait deux parties. La première sur Interfaçage Haptique en Réalité Virtuelle et la deuxième partie portait sur les simulateurs et la simulation de conduite. Les étudiants suivants ce cours sont inscrits en *dernière année de Magister (équivalent Master 2 Recherche)*.

Contribution à la commande des dispositifs à retour haptique

6

Sommaire

6.1 Historique et état de l'art . . . 65
6.1.1 La simulation haptique en réalité virtuelle . . . 66
6.1.2 Commande des interactions à rendu haptique . . . 69
6.2 Commande des systèmes téléopérés en présence de retard de transmission . . . 77
6.2.1 Le retard de transmission variable, un problème plus complexe . . . 78
6.3 Commande des dispositifs haptiques en présence de retard de transmission . . . 79
6.3.1 Approche prédictive référencée modèle . . . 80
6.3.2 Apports aux approches passives . . . 92
6.4 Application : Téléopération d'un robot mobile pour l'assistance aux personnes âgées . . . 93
6.4.1 Contexte et cadre du travail . . . 94
6.4.2 Schéma de commande . . . 94
6.4.3 Stratégie du rendu d'effort . . . 95
6.4.4 Effet joystick . . . 96
6.4.5 Résultats Expérimentaux . . . 97
6.5 Application : Rendu haptique distribué . . . 100
6.5.1 Problématique . . . 100
6.5.2 Etat de l'art . . . 101
6.5.3 Présentation de la plate-forme de simulation . . . 102
6.5.4 Architecture de communication et gestion de ressources . . . 103
6.5.5 Architecture Techniques basées sur le principe de l'enveloppe englobante . . . 104
6.6 Conclusion . . . 109

Après l'obtention de mon diplôme de DEA de Robotique en 1999, j'ai intégré le Centre d'Etudes Mécanique d'Ile de France (CEMIF) pour effectuer une thèse de doctorat dans le domaine du rendu haptique, sous la direction de Florent Chavand. Cette thèse portait sur la mise en place de nouvelles lois de commande pour les interactions haptiques

en présence de retard de communication. Ce chapitre expose, d'une part, une synthèse de la problématique étudiée en donnant un aperçu des commandes classiques et celles que j'ai développées, et d'autre part, mes actuelles orientations et travaux dans ce domaine.

6.1 Historique et état de l'art

L'exploitation simultanée de la téléopération à retour d'effort et des techniques de simulation et d'animation graphique, connue sous le nom de Réalité Virtuelle (RV), a rendu possible la mise en œuvre de l'interaction "haptique" avec des environnements virtuels entre plusieurs utilisateurs distants [50]. Cet éloignement entre les différents opérateurs permet de rendre possible la réalisation de tâches jusque-là inexistantes. En d'autres termes, il est facile de rassembler différents experts sur une unique maquette virtuelle. Par ailleurs, cette mise en place provoque de manière inévitable des retards de transmission relatifs au type de l'architecture de communication établie afin de connecter les divers sites "clients". Les problèmes provoqués par les latences de transmission dans les systèmes à retour d'effort et/ou haptique sont anciens et sont devenus dernièrement encore plus complexes après l'apparition des nouvelles technologies ou protocoles de communication tels qu'Internet. Cette complexité provient des fluctuations dans les temps de retard dues, entre autres, aux congestions du réseau.

D'un point de vue historique, les environnements virtuels ont été exploités en téléopération [1] dans diverses architectures de téléprogrammation et de visualisation prédictive lorsque le retard de transmission rendait impossible la réalisation des tâches. En effet, la téléprogrammation est une architecture qui consiste à désactiver les commandes classiques basées sur le principe du couplage bilatéral direct entre le poste de téléopération (site maître) et le télérobot (site esclave). Le couplage des deux sites est remplacé par deux boucles locales.

Le concept de la téléprogrammation, notamment l'idée d'utiliser un environnement virtuel couplé à une interface à retour d'effort, a donné lieu à une multitude de conceptions de systèmes de simulation interactive et multimodale à base d'environnements virtuels. Soulignons qu'en téléopération, le concept de la téléprogrammation a été proposé comme une architecture alternative pour pallier au problème du retour d'effort qui devenait instable en présence de retard de transmission [10]. D'un autre coté, la téléprogrammation souffrait d'un manque de fidélité du rendu d'effort et de la faible cohérence entre le rendu visuel et ce que ressent l'opérateur. De leur coté, les commandes classiques basées sur le principe de l'asservissement bilatéral (faisant appel à la théorie de passivité ou aux commandes prédictives) offrent des alternatives intéressantes mais restent handicapantes dans certains cas (éloignements importants des sites).

Par ailleurs, la conception des dispositifs à retour d'effort a évolué ; les dispositifs sont plus ergonomiques, plus maniables et de taille réduite (portables). Ainsi l'interface haptique en réalité virtuelle hérite doublement de la téléopération, comme c'est le cas pour les algorithmes de contrôle :

- l'interface matérielle en haptique est issue essentiellement de la technologie des dispositifs maîtres à retour d'effort (téléopération) ;
- les algorithmes de couplages sont en partie issus de la téléprogrammation mais aussi des simulateurs dynamiques utilisés en animation graphique et des lois de commande pour l'asservissement bilatéral.

1. La téléopération désigne les principes et les techniques qui permettent à l'opérateur humain de faire accomplir des tâches à distance de l'endroit où sont situées les machines qu'il contrôle. La téléopération, de part ce principe, élimine les risques relevant de travaux dangereux tels que l'exploration spatiale ou la manipulation de substances toxiques. Pour faciliter les différentes manœuvres de l'opérateur, les systèmes de téléopération peuvent intégrer des assistances telles que la visualisation graphique, des dispositifs d'interaction ou bien des systèmes pour la planification de tâches

Les applications du rendu haptique en réalité virtuelle concernent plusieurs domaines : les simulateurs interactifs chirurgicaux, les simulateurs de pilotage et de conduite automobile, les jeux et divertissements, le prototypage virtuel multi-métiers, etc.

6.1.1 La simulation haptique en réalité virtuelle

Un système de réalité virtuelle est une *simulation* par ordinateur dans laquelle le graphisme est utilisé pour créer un monde qui semble réaliste. Le monde synthétisé n'est pas statique, il répond aux ordres de l'utilisateur (gestes, paroles ou toutes autres commandes extérieures). La Réalité Virtuelle implique des interactions à travers de multiples canaux sensoriels : vision, touché, odorat, goût, ouïe.

La notion de réalité virtuelle date de plus trente ans, enregistrée sous le brevet américain n° 3 050 870 accordé à Morton HEILIG pour son invention baptisée " Sensorama Simulator ". Cette invention était constituée d'un système de vision en 3D réalisé avec des caméras diffusant un son stéréo ainsi que du vent à l'aide de petits ventilateurs situés près de la tête de l'utilisateur, et disposant d'un siège vibrant. Ainsi, il était possible de simuler des voyages à motocyclette ou en automobile. Actuellement, les prouesses techniques permettent de réaliser des mondes/objets virtuels à l'aide de bibliothèques graphiques en 3D ; les programmes professionnels de CAO sont nombreux. L'utilisateur peut créer interactivement les modèles d'un objet, les textures, les aspects spatiaux et leur attribuer des paramètres physiques (raideur, frottement, inertie, etc.). Toutes ces caractéristiques synthétiques peuvent être ressenties par l'opérateur via des dispositifs mécatroniques appelés "interface à retour haptique".

Contrairement aux modalités visuelle et auditive, la difficulté de la conception pour l'interfaçage haptique en réalité virtuelle réside dans le fait que la modalité haptique est "active". Concevoir un dispositif capable de rendre fidèlement aux utilisateurs les informations haptiques (effort, pression, vibration, température, etc.) requiert un support matériel et une approche de conception spécifique. Ceci est par exemple différent de la vision ou de l'audition pour lesquelles le prélèvement d'information ne modifie pas physiquement son support (respectivement écran ou écouteurs). La réalisation de l'interfaçage haptique nécessite donc des modules actifs capables de contraindre le mouvement de l'opérateur ou de stimuler ses capteurs haptiques.

6.1.1.1 Les dispositifs à retour haptique

Le mot *haptique* est d'origine grecque et signifie "sentir par le toucher". Il distingue généralement trois modalités sensorielles :

- la kinesthésie : elle comprend la perception des mouvements propres de notre corps et des efforts musculaires ;
- le sens tactile : il fournit des informations concernant le contact de la peau avec des objets de l'environnement virtuel (pression, vibration, rugosité, etc.). Le doigt (plus précisément la peau) possède des capteurs de pression qui nous donnent des informations sur le relief de l'objet parcouru ;
- le sens thermique : il nous renseigne sur la température de l'objet par rapport à notre doigt. Dans certains cas, le sens thermique est utilisé pour renseigner sur la nature de l'objet manipulé.

Un système à retour haptique à base d'environnement virtuel est constitué de trois parties essentielles :

- l'opérateur humain : il constitue l'élément central du système d'interaction ;
- l'interface haptique qui comporte à son tour trois modules :
  - ◇ l'interface matérielle ou dispositif haptique ;
  - ◇ l'interface informatique : c'est l'ensemble des algorithmes qui permettent de simuler la dynamique de l'environnement virtuel (détection de collisions entre objets virtuels, calcul des réponses aux collisions, intégration numérique) ;
  - ◇ l'interface de liaison ou de commande.
- l'environnement virtuel (EV) : c'est un monde purement informatique dans lequel s'effectuent les tâches.

Cette liste peut être étendue en ajoutant le "média de transfert". L'intégration de cette composante nécessite des connaissances fondamentales pour réussir une simulation haptique munie d'une architecture de communication quelconque (i.e. travail collaboratif distribué via Internet).

Une architecture générique d'un rendu haptique à base d'environnements virtuels est représentée par la figure 6.1. Plusieurs études psychophysiques montrent que le retour visuel conditionne la perception haptique. Par conséquent, il est important de maintenir une cohérence entre les rendus visuels et haptiques. Cette contrainte est importante pour le maintien d'un réalisme perceptif.

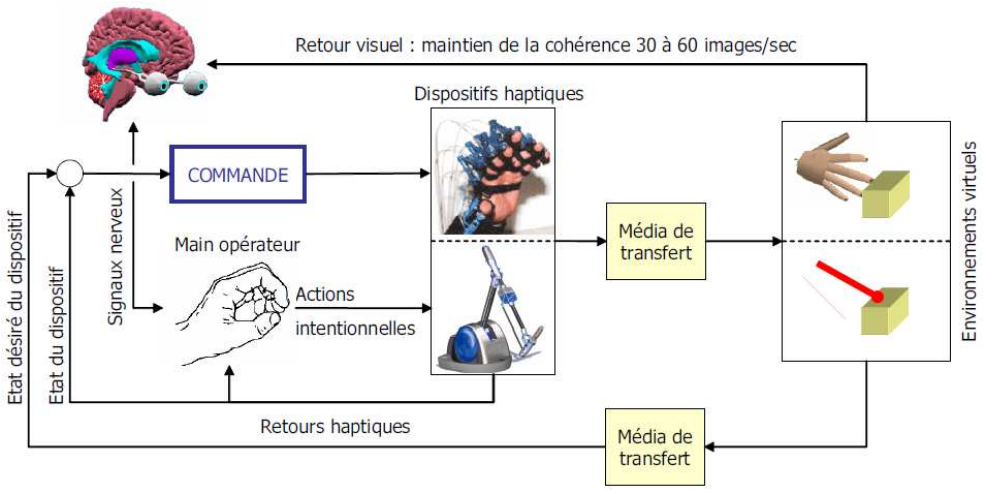

FIGURE 6.1 – *Architecture simpliste d'un rendu haptique en réalité virtuelle.*

La figure 6.1 illustre deux types de rendus haptiques sur la main de l'opérateur. Afin de restituer l'information haptique, un dispositif matériel directement lié à l'opérateur est nécessaire pour échanger le flux d'informations haptiques entre l'opérateur et l'environnement virtuel. Du point de vue mécatronique, plusieurs conceptions matérielles sont possibles. Elles dépendent de l'application envisagée, mais chacune présente des contraintes qui lui sont propres. Par exemple, un gant de données exosquelette muni d'un traqueur 3D permet idéalement de contrôler une main virtuelle grâce aux mouvements des doigts de l'opérateur basées sur les articulations de l'exosquelette robotique (cas A de la figure 6.1).

Quand l'application le permet, il est préférable de considérer plutôt une représentation de l'outil utilisé (cas B sur la figure 6.1) pour en faire un dispositif haptique. La représentation virtuelle (connue aussi sous le nom de "avatar virtuel") concerne alors le dispositif et non la main de l'opérateur. Dans ce cas, l'opérateur manipule directement l'outil.

L'ensemble de la simulation haptique peut être vu comme un système acceptant des consignes provenant du système nerveux humain. En effet, ces consignes se traduisent par un ensemble de mouvements imposés par l'opérateur afin de transmettre une action au sein de l'environnement de synthèse. Nous les désignons par intentions d'action ou consignes. Cette action qui se produit au sein de l'environnement virtuel n'est pas nécessairement conforme à celle envisagée par l'opérateur humain. Quant à l'état du dispositif haptique, il dépend des paramètres de commande, des intentions de l'opérateur et des retours sensoriels issus du monde virtuel. L'état désiré du dispositif haptique peut être obtenu de deux façons :

- soit comme une fonction directe de l'état de l'avatar virtuel rendu ;
- soit une fonction de la différence entre ce qui est voulu et ce qui est réalisé.

Les dispositifs à retour d'effort sont utilisés pour générer des impédances mécaniques au sens d'une relation dynamique entre l'effort (force) et le flux (vitesse). Lorsqu'il s'agit de représenter une manipulation d'un point massique, ce dispositif doit exercer sur la main de l'opérateur une force proportionnelle à l'accélération, alors que s'il représente la déformation d'un objet élastique comprimé, il génèrera une force proportionnelle au déplacement. Pour ce qui est de la partie matérielle de l'interfaçage haptique, il existe de nos jours plusieurs conceptions. Bon nombre d'entres elles sont toutefois une adaptation des bras maîtres ou des syntaxeurs utilisés en téléopération à retour d'effort. Par conséquent, ces interfaces sont conçues moyennant les mêmes technologies que celles employées pour la téléopération. Il s'agit, par exemple, d'interfaces à retour d'effort de types bras maîtres, joysticks, stylos à retour d'effort, etc. Par exemple, les deux dispositifs PHANToM^{TM} illustrés par la figure 6.2 ont été mis au point par deux chercheurs du MIT [2] , Massie [51] et Salisbury [1], et empruntent beaucoup aux bras maîtres en téléopération.

FIGURE 6.2 – *Deux types de stylo PHANToM de SensAble Technologies.*

6.1.1.2 Applications des systèmes haptiques à base d'environnements virtuels

Les domaines d'applications des systèmes à retour haptique en réalité virtuelle sont multiples et variés. Ainsi, une interface haptique à base d'environnements virtuels interactifs s'avère utile dans :

- le domaine médical : lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des simulateurs d'entraînement et d'apprentissage pour les chirurgiens ou obstétriciens (figure 6.2.gauche).

2. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

Ces systèmes offrent l'avantage de se passer de cadavres ou de patients et de simuler une multitude de pathologies moyennant d'une part une base de données cliniques et des modules de reconstruction virtuelle, et d'autre part, des modélisations biomécaniques des tissus humains ;
- le domaine d'apprentissage du pilotage et de la conduite d'engins complexes : simulateurs de vol, simulateurs de conduite automobile, simulateurs de chars... Une filiale de Thalès, s'est spécialisée, entre autres, dans ce domaine ;
- les jeux vidéo, les divertissements et la ludo-pédagogie éventuellement distribués sur Internet ;
- la téléopération et le contrôle de systèmes à distance, notamment les architectures de téléprogrammation, qui se basent sur une représentation virtuelle du robot distant et de son environnement, et les architectures de téléprésence ;
- l'ingénierie concurrente et le prototypage virtuel multi-utilisateurs (figure 6.2.droite). Cette mise en œuvre peut être utilisée pour des opérations de montage/démontage dans le domaine automobile. De ce fait, plusieurs utilisateurs de métiers différents se trouvant sur des sites éventuellement distants, peuvent interagir ensemble et partager la même maquette virtuelle.

Durant les dernières années, les chercheurs ont porté un intérêt particulier au prototypage virtuel et à l'ingénierie concourante collaborative via le réseau. Par contre, le défi important est à relever pour pouvoir bénéficier de tous les avantages d'une architecture haptique distribuée, est celui relatif aux problématiques dues au phénomène du retard (constant ou variable).

6.1.2 Commande des interactions à rendu haptique

6.1.2.1 Aspects de modélisation

Du point de vue de l'automatique, les objectifs essentiels en termes de rendu haptique s'apparentent beaucoup à ceux des systèmes de téléopération asservis par un couplage bilatéral :
- l'interconnexion des différents systèmes doit être stable quelles que soient les situations d'usages ;
- en mode contraint (au contact) le retour d'effort est ressenti via l'action qu'exerce le dispositif sur l'opérateur selon les mêmes directions que les efforts exercés par celui-ci (principe de l'action/réaction). Selon ces directions de puissance, le dispositif et le système de commande doivent sécuriser cette interaction ;
- la transparence (fidélité du rendu haptique mais aussi du transfert des actions désirées de l'opérateur) doit être optimale.

Bien que de nombreux formalismes soient possibles pour modéliser l'ensemble du système, de nombreux auteurs se basent sur des modèles empruntés à la théorie des réseaux électriques.

Le formalisme des quadripôles est particulièrement bien adapté en téléopération ; il a été utilisé pour modéliser les interactions haptiques. Cette approche est d'autant plus motivée qu'il existe des analogies bien connues entres composants mécaniques et électriques. On peut donc s'inspirer des propriétés de passivité des quadripôles pour en déduire des commandes stables. Par exemple, on sait que l'interconnexion parallèle de deux systèmes passifs donne lieu à un système stable. Il y a aussi des critères analytiques de passivité qui peuvent être utilisés pour trouver des conditions de stabilité. Certains auteurs [52]

se basent sur des schémas complètement électriques pour faire la synthèse de la loi de commande et transposent les résultats obtenus en substituant les composants mécaniques à leurs équivalents électriques.

Il est vrai par ailleurs que ces études ne portent en général que sur un système maître-esclave à un degré de liberté avec un modèle linéaire. Si ce modèle permet de comprendre l'essentiel des stratégies à mettre en place, il peut s'avérer difficile de généraliser les commandes obtenues aux dispositifs à retour d'effort multiaxes (plusieurs degrés de liberté). Les modèles dynamiques des systèmes robotiques sont connus pour être non-linéaires. Cependant, certaines différences entre les dispositifs à retour d'effort utilisés en téléopération [53] et ceux qui sont utilisés dans les applications de réalité virtuelle, doivent être prises en compte pour contourner quelque peu ce problème. En effet, d'un point de vue pratique, on voit bien que l'interfaçage matériel du rendu haptique utilisé en réalité virtuelle évolue vers des dispositifs compacts pouvant facilement s'intégrer à un espace "bureautique". Les dispositifs à retour d'effort des applications envisagées sont nettement moins encombrants que les bras maîtres utilisés en téléopération. Ainsi, presque la totalité des dispositifs à retour haptique envisagés pour les applications de réalité virtuelle sont des interfaces de "*taille humaine*" qui doivent permettre une manipulation manuelle sans effort, dans des espaces de travail adéquats. Un effort considérable est dévoué à leur allègement moyennant l'utilisation de matériaux légers pour la structure mécanique, des systèmes mécaniques de contrepoids et des commandes intégrées de compensation de poids et d'inertie.

Les actionneurs utilisés sont généralement à entraînement direct. L'amplification des efforts et leurs transmission ainsi que la transmission du mouvement se fait par des systèmes à très faibles frottements. Contrairement aux systèmes de téléopération pour lesquels l'inertie du dispositif est importante, les inerties des dispositifs haptiques utilisés en réalité virtuelle sont rendus très faibles (relativement à ce que peut percevoir et contrer l'opérateur) grâce aux allègements réalisés sur les structures. Par ailleurs, il peut être relevé qu'un espace de travail réduit limite les accélérations et les vitesses que peut effectuer l'opérateur lorsqu'il interagit avec la simulation. Cela ne veut pas dire que c'est un défaut, mais ce qui est conséquent est que les effets inertiels sont négligeables. Pour résumer, la conception des dispositifs à retour d'effort tendent vers :

- une intégration bureautique en termes d'espace de travail, c'est-à-dire conforme à l'application envisagée et ainsi à un volume de travail ni très réduit ni surdimensionné ;
- une réversibilité accrue et des transmissions très fiables impliquant des frottements faibles ;
- une faible inertie et, si possible, un équilibrage par conception mécanique.

En prenant en compte les éléments précédents, il devient possible de modéliser, au niveau du point terminal, une grande classe de dispositifs à retour haptique comme une masse/inertie apparente que l'opérateur manipule dans l'espace atteignable du dispositif, et un frottement apparent ressenti. Dans sa thèse, Gosselin [54] propose un ensemble d'outils pour estimer cette masse/inertie et ce frottement apparents pour un ensemble de structures robotiques typiques des dispositifs haptiques. On y trouve aussi des méthodes pour le dimensionnement et la conception des dispositifs haptiques.

La masse apparente admissible par un opérateur semble être de l'ordre de 0,05 kg pour un travail qui dure moins d'une demi-heure [55]. Les forces de frottements admissibles sont comprises entre 1 N à 4 N. Notons que ces valeurs sont variables en fonction

de la taxonomie de la prise. En effet, ces valeurs doivent être revues à la baisse lorsqu'il s'agit de prises de précision par exemple. Soulignons que ces valeurs sont celles qui sont admises. Par conséquent, un dispositif haptique idéal doit avoir une masse et un frottement apparents les plus faibles possibles. Dans le cas contraire, il est nécessaire que les inerties et les frottements soient compensés par la commande.

Si on prend en compte les hypothèses décrites précédemment, un modèle linéaire s'avère suffisant pour étudier un bon nombre de dispositifs à retour haptique.

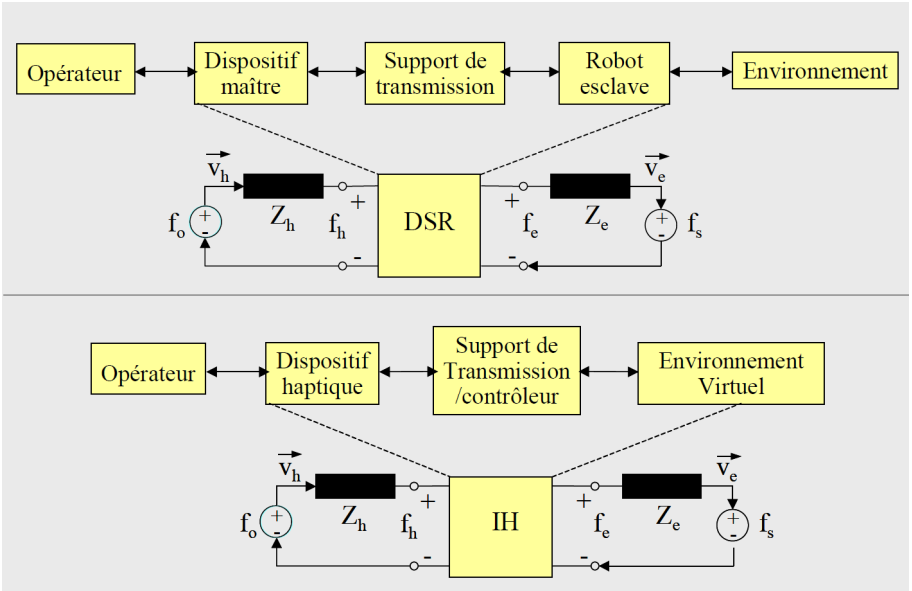

FIGURE 6.3 – *Similitudes entre couplage bilatéral en téléopération et commande des dispositifs à rendu haptique en réalité virtuelle [1].*

La première ligne de la figure 6.3 illustre une modélisation d'un système de téléopération par un réseau [56], [57]. La deuxième ligne montre un modèle similaire pour un interfaçage haptique. Dans les deux cas, l'opérateur, supposé passif, est modélisé par un dipôle. Les dispositifs haptiques et le canal de transmission sont représentés par des quadripôles chaînes (qui permettent de construire aisément un système en connectant en cascade plusieurs quadripôles). En téléopération, le robot, représenté par un seul axe, est aussi modélisé par un quadripôle chaîne [58], [59], [60]. Pour ce qui est des applications en réalité virtuelle, l'objet virtuel manipulé par l'opérateur pourrait être substitué au "robot esclave". L'objet virtuel serait alors pareillement représenté par un quadripôle chaîne. Toutefois, cet objet virtuel (à part le fait que sa position soit donnée par l'opérateur) n'est une entité "existentielle" que par le moteur de simulation qui se charge de calculer l'évolution de l'ensemble des objets virtuels sans distinction. C'est la raison pour laquelle l'objet virtuel manipulé est intégré au dipôle environnement virtuel, plus précisément au moteur de simulation dynamique. Les forces, ainsi que la différence entre, d'une part, l'état désiré (intention de l'action de l'opérateur portée au sein de l'environnement virtuel) et, d'autre part, l'état cohérent "réel" de l'objet virtuel manipulé (calculé par le moteur de simulation dynamique), sont utilisées comme consignes par le système de commande du dispositif haptique. Les boucles d'asservissements locales devront alors assurer le rendu haptique le plus fidèlement possible.

Prenons le cas d'un dispositif maître à retour d'effort ayant seulement un degré de liberté (figure 6.4). Le modèle dynamique s'écrit :

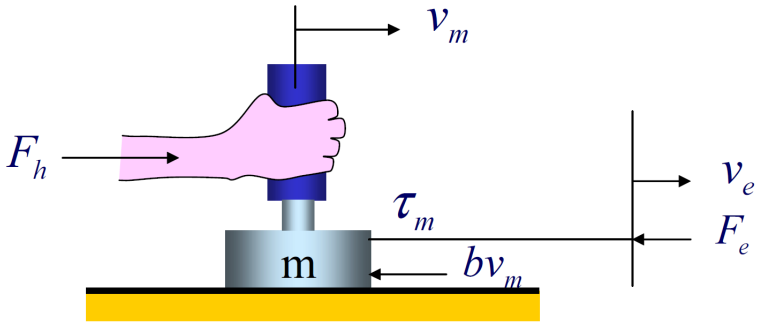

FIGURE 6.4 – *Dispositif haptique à un degré de liberté [2].*

$$m_m\ddot{x}_m + b_m\dot{x}_m = F_h + \tau_m \tag{6.1}$$

où m_m est la masse du dispositif maître, b_m est le frottement estimé du dispositif maître, $\dot{x}_m$ est la vitesse du dispositif maître, $\ddot{x}_m$ est l'accélération du dispositif maître, F_h est la force (ou couple) qu'exerce l'opérateur sur le dispositif et enfin τ_m est la force (ou couple) issue de la commande (c'est le signal de commande considéré).

6.1.2.2 Aspects de commande

Supposons l'existence d'un robot esclave. Par analogie au modèle maître, son modèle s'écrit aussi :

$$m_e\ddot{x}_e + b_e\dot{x}_e = -F_e + \tau_e \tag{6.2}$$

où m_e est la masse du robot, b_e est le frottement estimé du robot, $\dot{x}_e$ est la vitesse du robot, $\ddot{x}_e$ est l'accélération du robot, F_e est la force (ou couple) qu'exerce l'environnement sur le robot lorsque ce dernier est en contact et enfin τ_e est la force (ou couple) issue de la commande (c'est le signal de commande considéré).

En téléopération, il y'a quatre modes d'asservissement par couplage bilatéral possibles [61], [62] :

- couplage position - position : dans ce mode, le robot esclave est asservi en position sur le maître et le dispositif de commande maître est asservi en position sur l'esclave. Ainsi les deux systèmes robotiques s'asservissent mutuellement. Le retour d'effort est assuré par le couple dû à l'écart entre les deux dispositifs au contact. En prenant deux correcteurs de type proportionnels dérivés avec $\epsilon = (x_m - x_e)$, cette commande s'apparente à :

$$\begin{aligned} \tau_e &= k_p\epsilon + k_d\dot{\epsilon} \\ \tau_m &= -k_p\epsilon - k_d\dot{\epsilon} \end{aligned} \tag{6.3}$$

- couplage position - force : dans ce mode, le robot esclave est asservi en position alors que le dispositif maître est asservi en force (délivrée par un capteur de force). Cette commande se schématise ainsi :

$$\begin{aligned} \tau_e &= k_p\epsilon + k_d\dot{\epsilon} \\ \tau_m &= F_e \end{aligned} \tag{6.4}$$

– couplage force - position : dans ce mode, le robot esclave est asservi en force et le dispositif maître en position [63] :

$$\begin{aligned} \tau_e &= F_h \\ \tau_m &= -k_p \epsilon - k_d \dot{\epsilon} \end{aligned} \tag{6.5}$$

– couplage force - force : asservissement mutuel en force. Ce mode n'est pas très utilisé en raison de ces pauvres performances en suivi de position (peut engendrer des dérives en position) [64], [65], [66] :

$$\begin{aligned} \tau_e &= F_h \\ \tau_m &= F_e \end{aligned} \tag{6.6}$$

Ces lois de commande ne sont que schématiques. Leur implantation pratique nécessite tout de même quelques ajustements. On peut appliquer le même raisonnement aux interfaces haptiques. Si, en téléopération, un capteur d'effort s'avère parfois impossible à mettre en place sur le bras d'un robot esclave (coût élevé, encombrement, ne répond pas aux normes de raideur mécanique ou d'étanchéité, peu robuste aux conditions de l'environnement...), dans les applications de réalité virtuelle il est "gratuit" du côté de l'environnement virtuel et fait partie du simulateur dynamique. Ainsi, tous les schémas de commande précédents s'appliquent aux dispositifs haptiques des applications de réalité virtuelle.

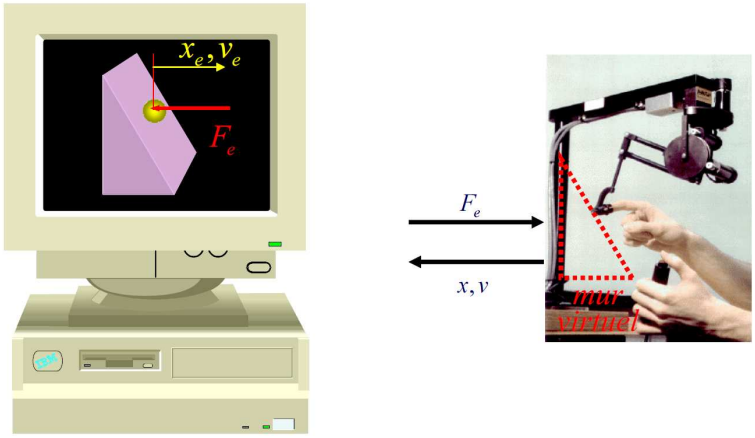

FIGURE 6.5 – *Principe du retour d'effort classique.*

La figure 6.5 illustre un schéma de commande "classique" position/force. La position (ou la vitesse) du point terminal (la prise est dans ce cas en dé à coudre) de l'interface haptique commande la position de la sphère virtuelle au sein de l'environnement virtuel. Les algorithmes de détection de collisions informent le simulateur dynamique d'une éventuelle collision. Dans le cas où il n'y a pas de contact (mouvements libres) le système de commande du dispositif doit émuler la dynamique de l'objet virtuel (effet inertiels, poids ou autres). Dans le cas où un contact est détecté, la force de réaction est calculée et est envoyée au système de commande comme consigne (dans la figure 6.5, la force calculée pénalise l'interpénétration). Dans ce qui suit, on ne considère qu'un seul dispositif robotique. Il s'agit du dispositif haptique dont on supprime les indices "m".

Un correcteur simple serait alors dérivé directement du théorème des travaux virtuels :

$$\tau = J^T(q) F_e \tag{6.7}$$

où $J^T(q)$ est la transposée de la Jacobienne du dispositif haptique, et q est la coordonnée articulaire. Dans ce cas, $F_e = (k_p\delta + k_d\dot{\delta})\vec{n}$, δ est l'estimation de l'interpénétration entre l'objet virtuel manipulé par l'opérateur et l'objet virtuel avec lequel il est entré en collision, $\dot{\delta}$ est la dérivée numérique de l'interpénétration, $\vec{n}$ le vecteur normal au point de contact estimé et k_p et k_d sont des gains qui doivent normalement être liés aux caractéristiques de l'objet. En particulier, si l'objet est rigide, alors $k_p \to \infty$! On voit bien que dans ce cas, on ne peut pas affecter à la consigne des raideurs réelles des objets virtuels. Il s'agit de gains liés à la commande (même si elle n'est pas de très bas niveau).

Cette approche classique ou celle basée sur le principe d'une "raideur active" ne sont pas très performantes en pratique. En effet, les discontinuités, si elles ne sont pas traitées par le simulateur dynamique [67], donnent lieu à des à-coups indésirables sur le dispositif dès que l'on passe d'une face à une autre. Un filtre permet certainement d'atténuer ces effets, mais supprime les à-coups réels quand on explore une arête réelle. Par ailleurs, les gains du correcteur peuvent fausser les caractéristiques haptiques réelles du contact, notamment lorsque ces gains sont ajustés pour assurer une bonne stabilité de l'interaction. Aussi, les systèmes de commande dérivés d'approches à base de pénalités (modèle masse-ressort) sont peu robustes.

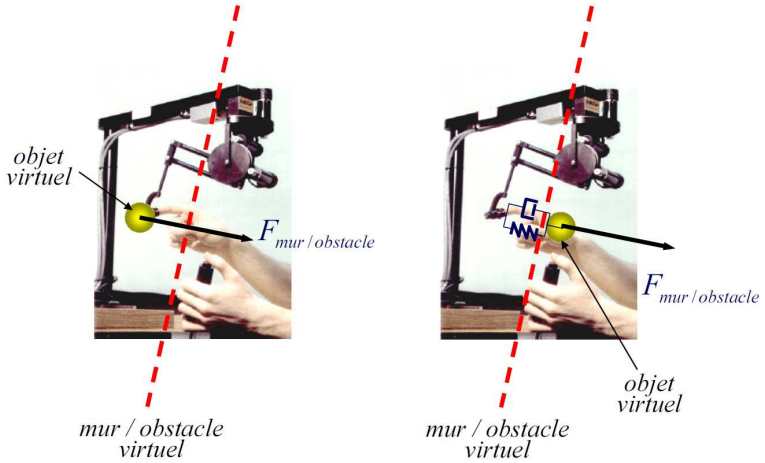

FIGURE 6.6 – *Principe du couplage virtuel*

Afin d'améliorer la robustesse des commande classiques, Colgate et al. [68] ont proposé une commande dite à "couplage virtuel" dont l'idée fondatrice est illustrée par la figure 6.6.

Au lieu de dériver la commande directement des forces synthétisées par le moteur de simulation dynamique, on la dérive d'un "mécanisme virtuel" liant l'état intentionnel de l'objet virtuel (point terminal du dispositif haptique) à l'état de l'objet virtuel calculé par le simulateur. Cette liaison est paramétrable et passive. Les paramètres sont synthétisés pour satisfaire les critères de stabilité et de performance [52].

Il est à signaler que cette approche, très référencée dans les applications de réalité virtuel, est équivalente en tous points aux mécanismes virtuels développés en téléopération [69], [70].

Néanmoins l'approche présente quelques problèmes liés notamment à l'intégration de la dynamique du couplage. Cependant, au lieu de vouloir résoudre ce problème du côté de la commande, il nous paraît plus judicieux de le transposer comme faisant partie

du simulateur dynamique. Ce que l'on peut aussi noter, c'est que le rendu est un rendu d'impédance ou d'admittance [71], [72], [73] (selon le schéma de commande choisi).

Avant d'expliquer brièvement comment s'effectue la synthèse des paramètres du couplage virtuel, il est temps maintenant d'ouvrir la parenthèse du problème typique des applications de réalité virtuelle : l'échantillonnage.

L'environnement virtuel est discret par conception : les équations différentielles doivent être transformées en équations aux différences et les transformations fréquentielles à la transformée en Z. Le modèle d'interaction de l'environnement virtuel est régi par des équations discrètes. Jusqu'ici nous avons supposé que les synthèses effectuées en continu peuvent s'appliquer au cas discret. Il faudrait alors soit motiver une telle hypothèse soit décrire les changements à effectuer. En fait, la fonction de transfert discrète de la commande haptique peut être obtenue en remplaçant, dans sa fonction de transfert continue, l'opérateur de dérivation par l'opérateur discret :

$$\frac{z-1}{Tz} \tag{6.8}$$

ou par :

$$\frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \tag{6.9}$$

opérateur bilinéaire de Tustin qui conserve la passivité, et T est la période d'échantillonnage. En général, les gains synthétisés en continu doivent être revus "à la baisse" mais la bande passante requise pour asservir les interfaces haptiques impose une fréquence d'échantillonnage élevée. Dans ce cas, la synthèse peut être faite en continu, puis transposée par les transformations précédentes en discret. Cependant, plusieurs auteurs font la synthèse du correcteur directement en discret [52] ou par application de la théorie des lignes [56] et de la répartition [74].

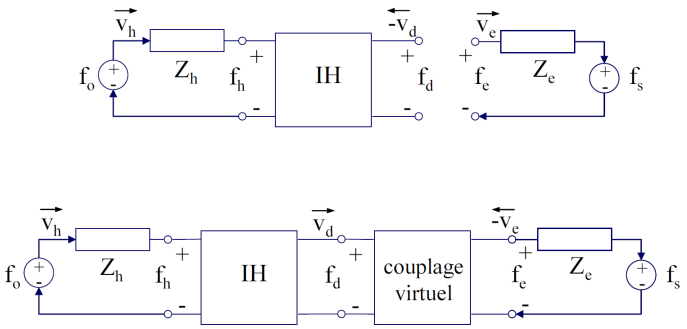

FIGURE 6.7 – *Implémentation et intégration d'un couplage virtuel dans un schéma de contrôle pour le retour haptique.*

Reprenant les éléments de la figure 6.3, l'intégration du couplage virtuel dans une représentation en quadripôle est illustrée sur la figure 6.7. Le couplage virtuel (dans cet exemple il ne concerne qu'un seul axe) se fait par une matrice de transfert type chaîne. Les transferts concernent ceux du couplage virtuel, dans un premier temps paramétré. Afin d'exploiter les propriétés de passivité, il est nécessaire de raisonner en termes de flux et d'effort. Ainsi, les paramètres à considérer pour la commande sont la vitesse (flux) et la force (effort).

Le calcul des gains se fait en se fixant des objectifs en termes de stabilité. Si on souhaite avoir une stabilité accrue, on peut concevoir la commande de manière à ce que l'ensemble

de l'interfaçage soit passif [75] (en considérant que les dipôles opérateur et environnement le soient aussi). Dans ce cas, on peut imposer à chaque quadripôle, pris indépendamment des autres, le critère de passivité. On peut tout aussi bien considérer le quadripôle chaîne résultant et lui appliquer le critère de passivité [76].

Un réseau est dit passif s'il ne fournit pas plus d'énergie qu'il en reçoit [77]. En termes analytiques :

$$\begin{array}{l} E_h = \int_{-\infty}^{t} F_h(\kappa) v_h(\kappa) d\kappa \geq 0 \\ E_e = \sum_{k=-\infty}^{N} F_e(k)(v_e(k) - x_e(k-1)) \geq 0 \end{array} \tag{6.10}$$

E_h et E_e sont les énergies au niveau du dispositif haptique et de l'environnement virtuel (figure 6.7).

On peut aussi représenter le réseau par sa matrice de répartition équivalente. Dans ce cas, si $S(s)$ est la matrice de répartition du système considéré, alors :

Théorème 1 *Un réseau représenté par sa matrice de répartition $S(s)$ est passif si $S(s)$ est stable et $\|S(j\omega)\|_\infty \leq 1$.*

On peut aussi bien raisonner en termes de stabilité inconditionnelle. En effet :

Définition 1 *Un système linéaire à deux ports est dit inconditionnellement stable en mode couplé, s'il n'existe pas de terminaisons 1-port passives telles que le système couplé est instable.*

Cette propriété peut être vérifiée grâce au théorème de Llewellyn [78] :

Théorème 2 (Llewellyn) *Soit $Q(j\omega)$ une matrice d'immitance donnée, telle que $Q(j\omega) = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$.*

La stabilité inconditionnelle en mode couplé est garantie par les conditions nécessaires et suffisantes suivantes :

$Q(s)$ *est stable si*, $\forall \omega \leq 0$,

$$\begin{cases} \Re(q_{11}) \leq 0 \\ 2\Re(q_{11})\Re(q_{22}) \leq |q_{12}q_{21}|\, \Re(q_{12}q_{21}) \end{cases}$$

Jusqu'ici, nous avons mis l'accent sur la stabilité de l'interaction haptique. Ces critères ont pu être étendus à des environnements virtuels à base de modèles non linéaires [79], [80]. Si ce critère s'avère primordial, il n'est pas le seul à devoir être pris en compte. En effet, l'interaction haptique repose essentiellement sur trois objectifs :

- *objectif de stabilité* : on prendra le critère de stabilité inconditionnelle ou de passivité en mode couplé ;
- *objectif de transparence* : c'est la fidélité du rendu haptique caractérisée par :

$$\begin{array}{l} F_h = \sigma_f F_e \\ v_h = \sigma_v v_e \end{array} \tag{6.11}$$

  Ceci revient à avoir la matrice chaîne idéale :

$$\begin{bmatrix} \sigma_f & 0 \\ 0 & \sigma_v \end{bmatrix} \tag{6.12}$$

  où σ_f et σ_v représentent les facteurs d'homothéties en effort et en vitesse [81].
- *objectif qualitatif* : lié au comportement de l'interaction haptique en mode transitoire.

Nous avons simulé et testé bon nombre de ces lois de commande. A ce stade, on ne peut que mieux se rendre compte de l'apport de la technologie de la téléopération dans l'interfaçage haptique en réalité virtuelle. On peut certainement parfaire ces commandes et en développer d'autres. Les moteurs de simulation dynamique peuvent intégrer certains problèmes de la commande pour les résoudre plus efficacement. A l'inverse, la commande peut se faire de manière plus robuste pour ne pas imposer des contraintes supplémentaires au moteur de simulation dynamique (robustesse vis-à-vis des fluctuations du temps de boucle de simulation par exemple). Ces mutuels développements peuvent aussi intégrer les spécificités liées aux applications envisagées.

Parmi ces applications, nous portons un intérêt particulier à la commande de robots mobiles et au travail collaboratif. Cela suppose que plusieurs utilisateurs de plusieurs métiers, se trouvant sur des sites éventuellement distants, pouvent interagir ensemble et partager la même maquette virtuelle. Cela suppose aussi que ces utilisateurs puissent bénéficier, si besoin est, des mêmes apports technologiques notamment, en termes de rendu haptique. Mais, cette mise en place exige de résoudre un problème majeur lié aux retards de transmission que peut engendrer chaque média de communication. Ce retard peut compromettre l'ensemble de la simulation haptique et la rende instable.

Le problème du rendu haptique distribué a été étudié dans [82], [83] et [84]. Notre contribution principale est dans la commande de l'interfaçage haptique et concerne plus particulièrement la stabilisation du rendu kinesthésique en présence de retard de transmission. La similitude entre rendu haptique en téléopération et en réalité virtuelle nous pousse à voir comment ce problème a été pris en compte en téléopération. La section suivante est dédiée à ce sujet.

6.2 Commande des systèmes téléopérés en présence de retard de transmission

En téléopération, l'effet du retard sur la stabilité du retour d'effort a été démontré dès 1965 par Ferrell [85]. Certaines approches tentaient de compenser le retard considéré comme un défaut du système. Or, il s'est avéré qu'il n'était pas possible de l'éliminer du transfert, et ceci par quelque méthode que ce soit. La solution proposée dans [86] s'appuie sur une description quadripolaire des téléopérateurs. La stabilité du téléopérateur dérivera alors des propriétés de passivité des quadripôles. L'approche préconisée par Anderson et Spong consiste à imposer une ligne de transmission parfaitement passive et à imposer une matrice de répartition spécifique. Il suffira alors de déterminer les lois de commande qui réaliseront cette condition. Les résultats obtenus avec une telle commande montraient que le retour d'effort est stabilisé quel que soit le retard de transmission. Cependant, on constate aussi que la transparence, en termes de suivi de vitesse et de rendu de force, est dégradée. Dans [86], on attribuait la dégradation de la transparence au passage du modèle continu à une implémentation discrète. Les travaux décrits dans [87] confirment ces propos en testant une méthode discrète.

Une formulation plus élégante de cette approche a été introduite par Niemeyer et Slotine [88]. L'approche est fondée sur la théorie des ondes incidentes (entrée d'un système) et transmises (sortie d'un système) dans les lignes et utilise l'image de l'adaptation d'impédance pour éliminer les ondes transitoires.

Une autre architecture plus générale de la téléopération a été proposée dans [89]. Elle

tente d'optimiser la transparence et la stabilité. Toutefois, la principale conclusion de cette étude est de montrer que la transparence et la stabilité sont deux objectifs contradictoires en téléopération. Une stabilité robuste n'est obtenue qu'aux dépens d'une certaine dégradation de la transparence et vice versa. D'autres approches sont une reformulation ou une amélioration des méthodes précédentes [90, 91, 92, 93], etc.

Par ailleurs, des approches d'automatique avancée et/ou robuste, [94, 95, 96, 97], ont été testées sans grand succès. La dégradation de performances en termes de suivi de position.

En parallèle des méthodes d'automatique, quelques techniques de réalité virtuelle offrent aussi des alternatives intéressantes utilisant un environnement synthèse, telle que la prédiction graphique [98, 99], la téléprogrammation [100, 101], etc. Pour des raisons évidentes, ces méthodes ne s'appliquent pas à nos systèmes car le retard se situe justement entre l'opérateur et l'environnement virtuel !

En automatique linéaire, Smith a proposé de corriger les systèmes linéaires à retard constant par un bouclage prédictif [102]. En téléopération, cette méthode reposerait sur la prévision du comportement du robot esclave en interaction avec son environnement.

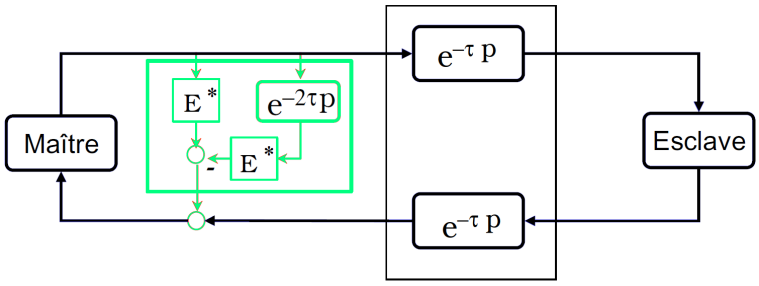

FIGURE 6.8 – *Implémentation d'un correcteur type prédicteur de Smith*

La figure 6.8 montre une implémentation d'un tel correcteur sur un système de téléopération. Dans le cas idéal où le processus et le modèle seraient identiques, la sortie du correcteur est considérée comme une prédiction du retour réel, puisque le retard est compensé par la prédiction ; sous réserve, bien entendu que E^* soit une estimation raisonnable du processus esclave réel et que le retard de communication τ soit connu. On montre aisément que le système est stable si les hypothèses citées précédemment sont respectées. En pratique, la marge d'imprécision de l'estimation augmente avec le retard. Par conséquent, une prédiction s'avère très complexe à mettre en œuvre en téléopération dans un environnement peu structuré. D'autres méthodes prédictives ont été proposées dans [103].

6.2.1 Le retard de transmission variable, un problème plus complexe

Toutes les méthodes de stabilisation précédemment évoquées, basées sur le contrôle bilatéral classique, ont pour hypothèse un retard de transmission constant. Or les protocoles de communications informatiques actuels ne garantissent pas cette condition. Cependant, un système de retour d'effort stable en présence de retards constants peut devenir instable lorsque le retard fluctue.

Pour remédier à ce problème, une première idée est de réaliser une compensation des variations de retard par l'ajout de retards fictifs, appelés "virtual time delay" pour pouvoir aboutir à un problème avec retard constant pour lequel les schémas de commande clas-

siques sont applicables [104]. Cette technique, basée sur le principe des variables d'onde, est handicapée par un inconvénient majeur à savoir la dégradation de performances en cas de retard conséquent. D'autres équipes de recherche ont proposé une pseudo compensation transparente [105, 106, 107, 77] en contrôlant la puissance consommée par le système. L'avantage de ces approches est d'assurer la passivité du système dans toutes les circonstances et de limiter les conséquences d'une instabilité passagère notamment quand les transmissions sont momentanément coupées (phénomène du "Blackout"). Cependant ces méthodes de commande en présence de retard variable assurent la stabilité, remise en cause par l'augmentation du retard, mais n'améliorent pas la fidélité du rendu haptique du fait qu'elles sont purement énergétiques [11], [13].

6.3 Commande des dispositifs haptiques en présence de retard de transmission

Cette section présente une approche que j'ai développé, basée sur le principe de la prédiction de Smith [102, 108]. Cette approche a été initiée pour la stabilisation des systèmes mono-variable linéaires en présence du temps de retard constant. D'autres approches, plutôt temporelles (celle de Smith utilise la représentation fréquentielle) utilisant des équations d'état, ont été développées pour le traitement de la robustesse vis-à-vis des problèmes de conditions initiales et les entrées de perturbations arbitraires [109, 110, 111].

Considérons le système linéaire mono-variable (SISO) décrit par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-\tau) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \tag{6.13}$$

$$x(0) = x_0, u(h) = u_0(h) \qquad -\tau \leq h < 0 \tag{6.14}$$

où u est l'entrée de commande du système, x est le vecteur d'état, y est la sortie, τ est le retard constant et u_0 est la condition initiale de l'entrée de commande comme définie par l'equation (6.14). A, B et C sont des matrices constantes avec des dimensions appropriées, en supposant que (A, B) est contrôlable et (C, A) est observable.

La fonction de transfert de la boucle fermée du système utilisant un retour d'état unitaire reliant la sortie $y(t)$ à l'entrée de référence désirée $y_d(t)$, figure (6.9), est donnée par :

$$\frac{Y(s)}{Y_d(s)} = \frac{C(sI-A)^{-1}Be^{-s\tau}}{1+C(sI-A)^{-1}Be^{-s\tau}} = \frac{G(s)e^{-s\tau}}{1+G(s)e^{-s\tau}} \tag{6.15}$$

où s est l'opérateur de la transformée de Laplace.

Dans cette fonction de transfert du système en boucle fermée, on peut remarquer que l'équation caractéristique contient un élément de retard "$e^{-s\tau}$" qui a conduit à un nombre infini de pôles (i.e. un nombre infini de valeurs propres pour le système) d'où la difficulté du contrôle. Utilisant la méthode de la prédiction de Smith [102], l'élément du retard sera éliminé de l'équation caractéristique du système par le retour $G(s) - G(s)e^{-\tau s}$ où $G(s) = C(sI-A)^{-1}B$ est le modèle mathématique du processus que l'on suppose bien identifié.

Sur la figure (6.9), ε est l'erreur entre l'entrée désirée $y_d(t)$ et la sortie du système $y(t)$.

La fonction de transfert du système en boucle fermée aura la forme suivante :

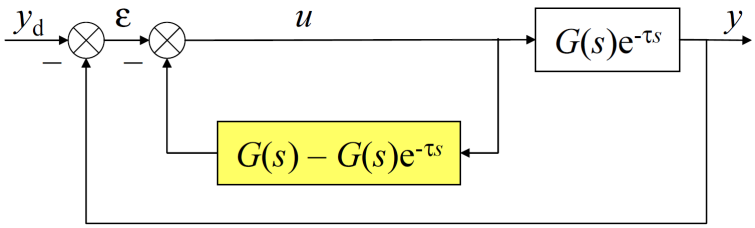

FIGURE 6.9 – *Principe de prédiction de Smith*

$$\frac{Y(s)}{Y_d(s)} = \frac{C(sI-A)^{-1}Be^{-s\tau}}{1+C(sI-A)^{-1}B} = \frac{G(s)e^{-s\tau}}{1+G(s)} \tag{6.16}$$

Il est à noter que l'élément de retard "$e^{-\tau s}$" est éliminé de l'équation caractéristique du système en boucle fermée. Cependant, le prédicteur de Smith ne sait pas manipuler les conditions initiales non-nulles et les entrées de perturbations arbitraires, plusieurs auteurs ont tenté de résoudre ce problème ([110, 111, 109]), leurs méthodes dérivées implicitement ou explicitement de la prédiction de Smith, malheureusement, ces méthodes n'assuraient pas des réponses désirées dans certains cas, [112].

La méthode de prédiction de Smith étant maintenant acquise, la section suivante présente la méthode que j'ai proposée pour stabiliser l'interaction haptique avec un environnement virtuel en présence de retards de transmission.

6.3.1 Approche prédictive référencée modèle

6.3.1.1 Principaux résultats

Avant d'aborder le problème des systèmes d'interaction à retour haptique en présence de retard, je présente ici un résultat générique utilisé dans le schéma de commande proposé que je détaille plus loin dans cette section.

La figure (6.10) représente un modèle global avec deux systèmes interconnectés définit respectivement par leurs fonctions de transfert G_1et G_2. Les entrées de références du système sont mentionnées respectivement par e_1 et e_2, les signaux de sorties sont y_1 et y_2, tous ces paramètres sont régit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} u_1 = e_1 - y_2 \\ u_2 = e_2 + y_1 \end{cases} \tag{6.17}$$

où $u_1$et u_2 sont les entrées de commande du système. τ_1 et τ_2 sont des retards appliqués aux sorties du système y_1 et y_2, figure (6.10).

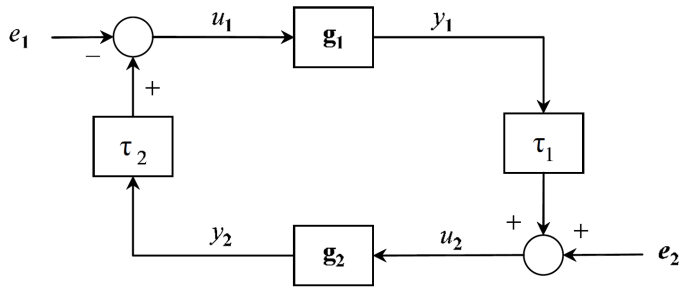

FIGURE 6.10 – *Système bouclé à deux entrées avec retards*

Définition 2 (Passivité) *Un transfert $G : u \to y$ est dit passif, s'il existe une constante $\beta \in \Re$:*

$$\langle y, u \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} y^T(t)u(t)dt \geq \beta \tag{6.18}$$

la constante β est l'énergie initialement stockée dans le système G.

Dans la théorie des systèmes interconnectés représentés par la figure (6.10), quand les retards de transmission $\tau_1(t) = \tau_2(t) = 0, \forall t \geq 0$ sont nuls, alors nous avons :

Théorème 3 (Van der Shaft [113]) *Si G_1 et G_2 sont passifs alors le système interconnecté complet, ayant comme entrées (e_1, e_2) et sorties (y_1, y_2), est à son tour passif, et strictement passif en sortie si les deux fonctions de transfert G_1 et G_2 sont à leur tour strictement passives en sortie.*

Preuve : *La preuve de ce théorème se fait en considérant que tous les transferts sont passifs, voir par exemple [113], [114] et [78].*

Remarque 1 *Cette propriété n'est pas préservée en présence de délai de transmission.*

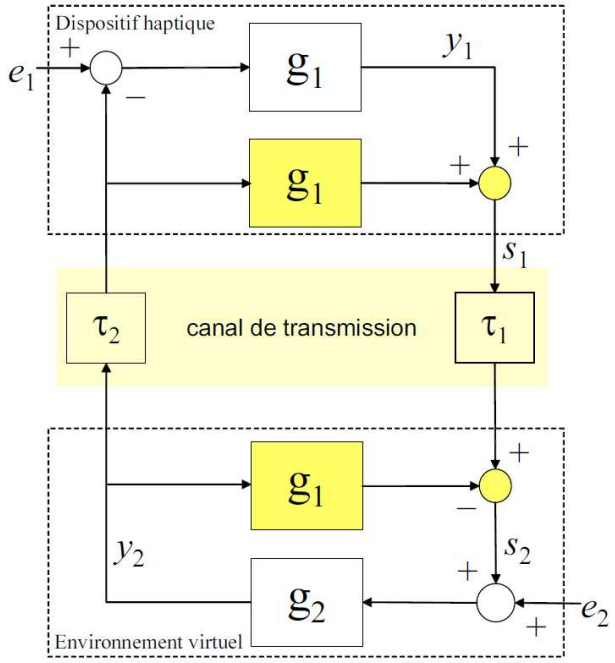

FIGURE 6.11 – *Schéma de la commande stabilisante*

Le résultat suivant, illustré par la figure 6.11, donne une commande générique pour la stabilisation de systèmes interconnectés en présence de retards ($\tau_1(t)$ et $\tau_2(t)$). Le résultat principal que j'ai obtenu s'énnonce comme suit :

Théorème 4 (Arioui [7]) *Le système interconnecté complet représenté par la figure (6.10) (retards non nuls, constants ou variables) peut être stabilisé en préservant sa passivité, en utilisant une commande basée sur le modèle mathématique du processus de l'un de deux systèmes G_1 ou G_2, comme le montre la figure (6.11).*

Preuve : *Les équations temporelles exprimant les entrées de commande et les signaux de sortie du système peuvent être décrites par le système d'équations suivant :*

$$\begin{cases} u_1(t) = e_1(t) - y_2(t) * h(t - \tau_2(t)) \\ u_2(t) = e_2(t) + y_1(t - \tau_1(t)) + y_{11}(t) * h(t - \tau_1(t)) - y_{12}(t) \end{cases} \tag{6.19}$$

où,

$$\begin{cases} y_1(t) = u_1(t) * g_1(t) \\ y_2(t) = u_2(t) * g_2(t) \\ y_{11}(t) = (y_2(t) * h(\tau_2, t)) * g_1(t) \\ y_{12}(t) = y_2(t) * g_1(t) \\ s_1(t) = y_1(t) + y_{11}(t) \\ s_2(t) = s_1(t) * h(\tau_1, t) - y_{12}(t) \end{cases} \tag{6.20}$$

$h(\tau_i, t)$ représente la réponse impulsionnelle du canal de transmission à retard variable τ_i.En supposant le modèle $g_1(t)$ connu et linéaire, l'équation de la sortie $s_1(t)$ devient :

$$s_1(t) = y_1(t) + y_{11}(t) = u_1(t) * g_1(t) + (y_2(t) * h(\tau_2, t)) * g_1(t) \tag{6.21}$$

En remplaçant $u_1(t)$ par sa valeur de l'équation 6.19, on obtient :

$$s_1(t) = (e_1(t) - y_2(t) * h(t - \tau_2(t))) * g_1(t) + (y_2(t) * h(\tau_2, t)) * g_1(t) \tag{6.22}$$

Cette dernière équation peut se simplifier de la façon suivante :

$$s_1(t) = e_1(t) * h(\tau_1, t) \tag{6.23}$$

Par substitution de l'équation précédente dans celle de $s_2(t)$, on obtient :

$$s_2(t) = (e_1(t) * g_1(t)) * h(\tau_1, t) - y_2(t) * g_1(t) \tag{6.24}$$

Il en découle de cette dernière équation le nouveau schéma représenté par la figure 6.12.

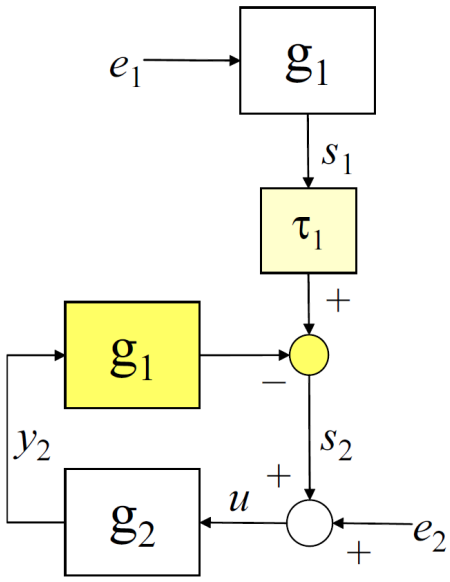

FIGURE 6.12 – *Schéma équivalent après correction*

A ce niveau le système équivalent obtenu après correction est illustré par la figure 6.12. Nous allons maintenant prouver que si les transferts g_1 et g_2 sont stables, alors le système est stable.

Considérons deux cas distincts : cas d'un retard constant et cas d'un retard variable.

retard constant : *dans ce cas, la réponse impulsionnelle $h(\tau_1, t)$ devient un opérateur retard linéaire auquel on peut appliquer la propriété suivante :*

$$(f * g)_\tau = f_\tau * g = f * g_\tau \tag{6.25}$$

Ainsi, l'expression de $s_2(t)$ se simplifie en :

$$s_2(t) = (e_1(t - \tau_1) - y_2(t)) * g_1(t)) \tag{6.26}$$

Le schéma équivalent du système obtenu est montré sur la figure 6.13. Comme les transferts g_1 et g_2 sont supposés passifs, alors le système bouclé (dont la nouvelle entrée est prise après τ_1) est passif, et le système complet pris entre e1 et e2 est implicitement stable.

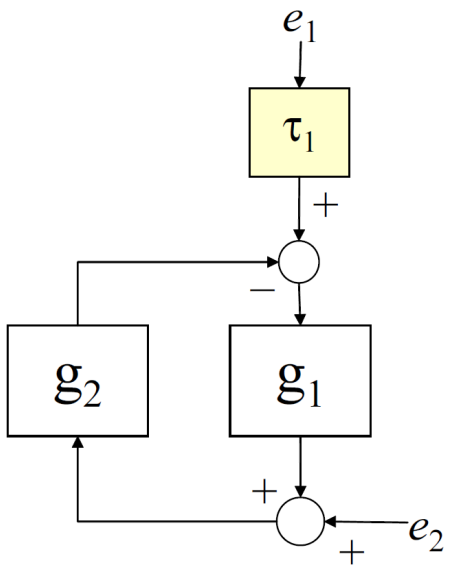

FIGURE 6.13 – *Schéma équivalent après correction : cas d'un retard τ_1 constant*

retard variable : *dans ce cas, le système ne se simplifie pas, c'est à dire que : $f_{\tau(t)} * g \neq f * g_{\tau(t)}$. Le système représenté par la figure 6.12 est étudié différemment du précédent cas : il suffit de montrer que le bouclage g_1, g_2 est stable. Il s'agit donc d'étudier la stabilité interne de tous les transferts décrits par l'équation suivante :*

$$\begin{bmatrix} s_2 \\ u \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + G_1 G_2} \begin{bmatrix} 1 & -G_1 G_2 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{1\tau_1} \\ e_2 \end{bmatrix} \tag{6.27}$$

où $s_{1\tau_1}$ est la sortie du canal $\tau_1(t)$ et constitue donc une entrée du système bouclé G_1G_2. u désigne l'entrée de commande de G_1G_2 après le comparateur, c'est-à-dire : $u = s_2 + e_2$. Dans ce cas, la stabilité du système est garantie car $\frac{1}{1+G_1G_2}$ est stable. En effet, G_1 et G_2 sont par hypothèse passifs et la mise en boucle fermée $\frac{G_1G_2}{1+G_1G_2}$ est passive, donc stable, et les pôles de $\frac{1}{1+G_1G_2}$ sont à partie réelle négative alors le transfert $\frac{1}{1+G_1G_2}$ est stable.

Ce résultat théorique est extrêmement important et jouit de plusieurs avantages.

Remarque 2 *On constate que le transfert g_1 qui se trouve dans la partie environnement virtuel peut ne pas correspondre au modèle du dispositif haptique. En effet, n'importe quel transfert passif suffit à*

engendrer un transfert $\frac{1}{1+G_1G_2}$ stable. Cette remarque n'est que théorique, car en pratique il faut considérer que l'on manipule des signaux physiques. Par conséquent, l'addition ou la soustraction d'un signal doit avoir un sens physique cohérent. On peut alors approcher le modèle du dispositif haptique et lui associer des constantes de temps ou des paramètres que l'on déterminera dans le but d'atteindre des objectifs en termes de performances.

Remarque 3 *Quelle que soit la "dynamique" du canal de transmission τ_2, elle n'agit pas directement sur le comportement de l'interaction haptique. En effet, le schéma équivalent dans le cas d'un retard constant ou variable montre que son effet est atténué par le correcteur proposé. Ainsi, seule la dynamique de τ_1 agit sur le bouclage. En d'autres termes, il faudrait en pratique s'arranger pour que la transmission des données à l'environnement virtuel se fasse en temps constant.*

Remarque 4 *Pour son intégration dans une interaction haptique, le correcteur proposé agit sur les consignes en termes de flux et d'effort. Il n'est donc pas nécessaire de réécrire les commandes bas niveau du dispositif haptique pour pouvoir l'implémenter. En d'autres termes, ce correcteur peut être implémenté sur un dispositif à armoire fermée. Nous l'avons réalisé sur un PHANToM^{TM} (réputé pour avoir une interface de commande fermée).*

6.3.1.2 Adéquation de la commande référencée modèle pour les interactions haptiques

Suite aux problèmes que pose l'utilisation d'un prédicteur de Smith en téléopération, nous avons constaté que la prédiction envisagée concernait l'évolution du robot dans son environnement (ce qui semble logique). Toutefois, nous avons aussi remarqué que la seule prédiction de l'évolution de l'environnement esclave aurait été suffisante pour stabiliser le téléopérateur à retour d'effort. Alors, la question que nous nous sommes posée est la suivante : quel serait le résultat si le prédicteur de Smith est déplacé du côté de l'esclave en effectuant la prédiction de la partie maître ?

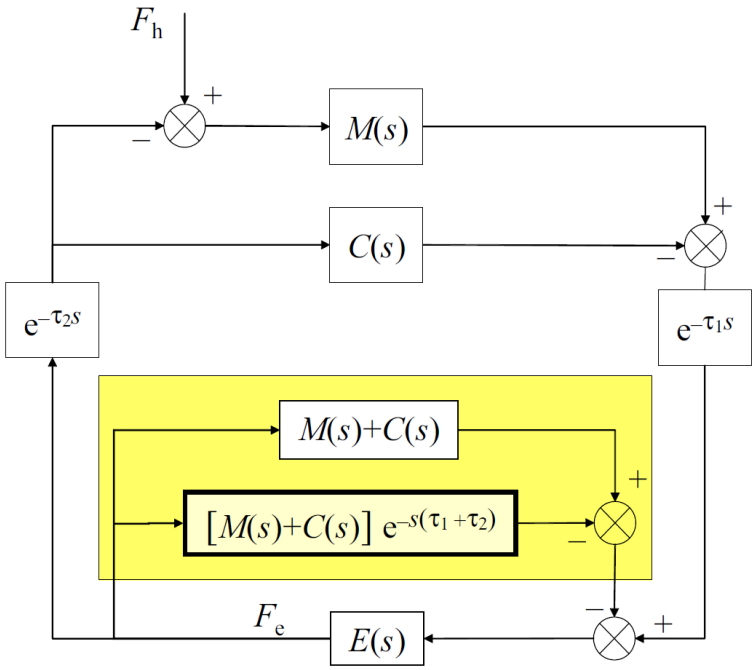

FIGURE 6.14 – *Prédicteur de Smith placé du côté de l'EV contrairement aux systèmes de TOP*

La figure 6.14 montre alors une telle tentative ; toute la partie grisée (colorée en jaune pour un document en couleur) représente le correcteur de Smith.

Prenons les modèles linéaires de la première section et notons $M(s)$ le transfert qui lie l'interface haptique à l'opérateur, $E(s)$ le transfert de l'environnement virtuel (supposé continu). τ_1 et τ_2 sont les canaux de transmission entre le dispositif haptique et l'environnement virtuel, $\tau_1(t)$ et $\tau_2(t)$ sont les retards (supposés pour l'instant constants) que subissent les données transmises respectivement par les canaux τ_1 et τ_2, $C(s)$ est le couplage virtuel développé plus haut.

Ecrivons l'équation qui décrit le comportement d'une interaction haptique en présence des retards de transmission mais sans le prédicteur de Smith (autrement dit en ignorant le contenu de la zone grisée de la figure 6.14). On obtient alors :

$$\left[\left(F_h - F_e e^{-s\tau_2}\right) M(s) - F_e e^{-s\tau_2} C(s)\right] e^{-s\tau_1} E(s) = F_e \tag{6.28}$$

Après quelques opérations algébriques, la fonction de transfert reliant la force de l'opérateur $F_h(s)$, à celle renvoyée par l'environnement virtuel $F_e(s)$, est comme suit :

$$\frac{F_e(s)}{F_h(s)} = \frac{M(s)E(s)e^{-s\tau_1}}{1 + e^{-s(\tau_1+\tau_2)}E(s)\left(M(s) + C(s)\right)} \tag{6.29}$$

On remarque que le retard apparaît dans le dénominateur de la fonction de transfert et l'interaction haptique est par conséquent instable à partir d'un retard donné.

Considérons maintenant le prédicteur de Smith (zone grisée ou jaune de la figure 6.14). Ecrivons alors le transfert équivalent du côté de l'environnement virtuel. On obtient la forme suivante :

$$E(s) = \frac{F_e(s)}{X_e(s)} = \frac{E(s)}{1 + E(s)\left(M(s) + C(s)\right)\left(1 - e^{-s(\tau_1+\tau_2)}\right)} \tag{6.30}$$

La fonction de transfert traduisant toute l'interaction haptique s'écrit alors :

$$\frac{F_e(s)}{F_h(s)} = \frac{M(s)E(s)e^{-s\tau_1}}{1 + E(s)\left(M(s) + C(s)\right)} \tag{6.31}$$

Cette équation montre qu'il n'y a plus d'éléments de retard dans l'équation caractéristique de la boucle fermée du système. Mais ce qu'il faut surtout relever est que seul le modèle du dispositif haptique est requis. Nous n'avons émis aucune hypothèse sur le signal d'entrée F_h. Affirmons que, contrairement au modèle d'interaction au sein de l'environnement virtuel, le modèle du dispositif haptique est parfaitement connu et parfaitement identifiable.

Par ailleurs, on peut remarquer que cette implémentation offre un avantage tout aussi intéressant. L'implémentation pratique de ce correcteur peut se faire de manière répartie et qui permet de s'affranchir de la connaissance de la taille/fluctuation des deux retards : une partie peut facilement être intégrée au système de commande du dispositif haptique et une partie est calculée par le simulateur dynamique [115, 116]. Ce qui permet d'éviter de mettre en place une structure tampon pour maintenir durant un certain temps les signaux utilisés par la commande (voir figure 6.15).

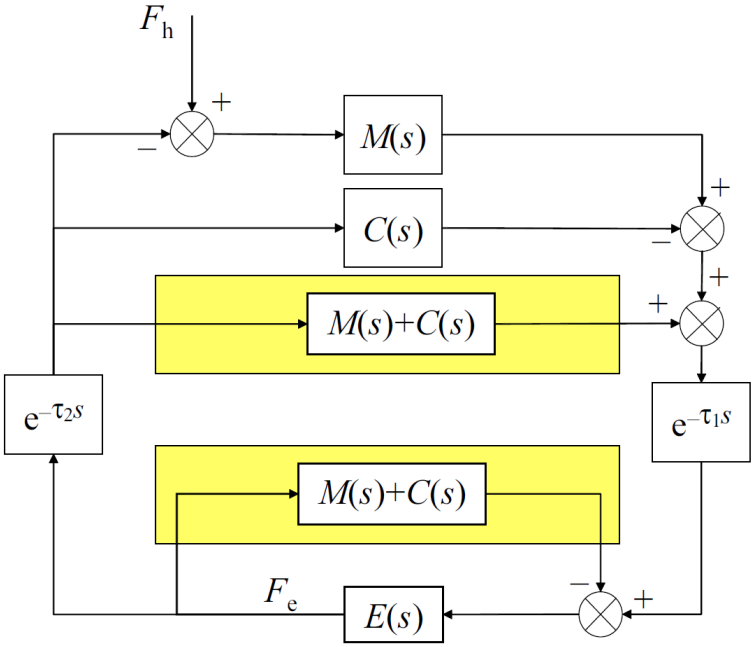

FIGURE 6.15 – *Implémentation pratique et avantageuse du correcteur présenté dans la figure 6.14*

6.3.1.3 Robustesse du schéma de commande

Nous avons vu que le système de commande proposé ne nécessite pas une estimation des retards de transmission. L'étude de la robustesse a été faite seulement dans le cas de retards constants car dans ce cas, on dispose d'outils mathématiques simples pour réaliser l'étude. Une méthode consisterait à voir comment évoluent les pôles de l'équation caractéristique de la fonction de transfert après correction. Pour cela, nous avons utilisé une approximation Padé [117] de l'élément de retard. Les résultats de cette étude, dont on ne développera pas les détails dans cette partie, ont démontré une assez bonne robustesse vis-à-vis des changements de paramètres du dispositif maître, [12].

6.3.1.4 Résultats de simulation

Avant d'implémenter le correcteur sur une véritable interface à retour haptique, nous avons effectué quelques simulations sous Matlab Simulink^{TM} . Cette section présente les résultats obtenus.

Le dispositif haptique considéré a une masse apparente de $m = 0{,}2\ kg$ et un coefficient de frottement de $b = 3\ Ns/m$. L'environnement virtuel est composé de deux objets simples : un point virtuel sans masse dont la position et la vitesse sont mises à jour conformément à celles délivrées par le dispositif haptique et un mur virtuel rigide de raideur K_e paramétrable. Dans une première série de simulations, les retards de transmission sont supposés constants, ayant chacun une valeur différente. Soit $\tau_1 = 1\ sec$ et $\tau_2 = 0{,}5\ sec$.

La figure 6.16 montre le résultat d'une simulation où l'objet virtuel est amené au contact du mur virtuel. On remarque d'abord que les positions du dispositif haptique et du point virtuel sont décalées. Ce décalage est dû au retard de transmission. Le schéma de commande choisi est un schéma position-force. Dans ce schéma, la force de retour fournie à l'opérateur via le dispositif haptique est prise directement de la force de réaction après collision du point virtuel avec le mur, c'est-à-dire de la force qu'exerce le mur virtuel sur

le point virtuel (au point de contact). On peut déjà constater que, lorsque le contact est établi, le comportement du retour d'effort est stable.

Tout au long de cette simulation, l'opérateur applique une force de profil sinusoïdal F_h. Cette force entraîne un déplacement cartésien du point terminal du dispositif haptique. C'est ce déplacement qui anime l'objet virtuel au sein de l'environnement virtuel. On suppose maintenant que l'on effectue une trajectoire rectiligne selon un axe donné. Le contact est réalisé lorsque la position de l'objet virtuel atteint 20 *cm* à partir de la position initiale (zéro). A cet endroit, le force calculée est dérivée soit d'une méthode à base de pénalité soit d'un couplage virtuel $C(z)$.

On peut noter par ailleurs que la vitesse de l'interface haptique v_m s'estompe au contact et que la force de retour F_e augmente de façon à équilibrer la force qu'applique l'opérateur au contact (c'est-à-dire que l'intensité de F_e est proportionnelle à l'interpénétration du point virtuel dans le mur virtuel). L'écart de position entre le point virtuel et le point terminal du dispositif haptique, notamment au point de contact, est incontournable et est dû au retard de transmission τ_2. De toutes les façons, quel que soit le correcteur utilisé, cet écart est inévitable (à moins d'avoir une double prédiction). Par contre, la position du point virtuel (x_e) est maintenue de manière stable au niveau du mur durant toute la période du contact.

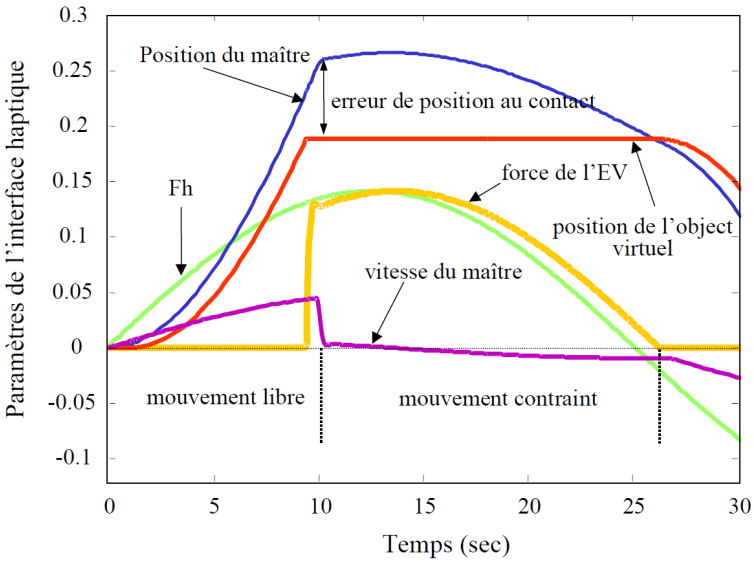

FIGURE 6.16 – *Simulation d'un comportement stable d'une interaction haptique en présence d'un retard constant*

La figure 6.17 montre les résultats d'une simulation de contact avec retour d'effort en présence d'opérateurs retards à temps de transmission variable. Les paramètres du dispositif haptique et de l'environnement virtuel sont les mêmes que ceux que l'on a fixés pour les simulations à retards constants. La variation du temps de retard $\tau_1(t)$ est représentée sur la même figure 6.17 (c'est la courbe la plus foncée (noir pour les documents couleurs)). Les valeurs du retard $\tau_1(t)$ ont été démultipliées par un facteur 10 afin que la courbe de la variation $\tau_1(t)$ soit au même niveau que les grandeurs des autres paramètres (c'est juste pour que la courbe soit visible sur la même figure et pour que l'on puisse facilement corréler les comportements). Cette variation du retard satisfait la condition de causalité.

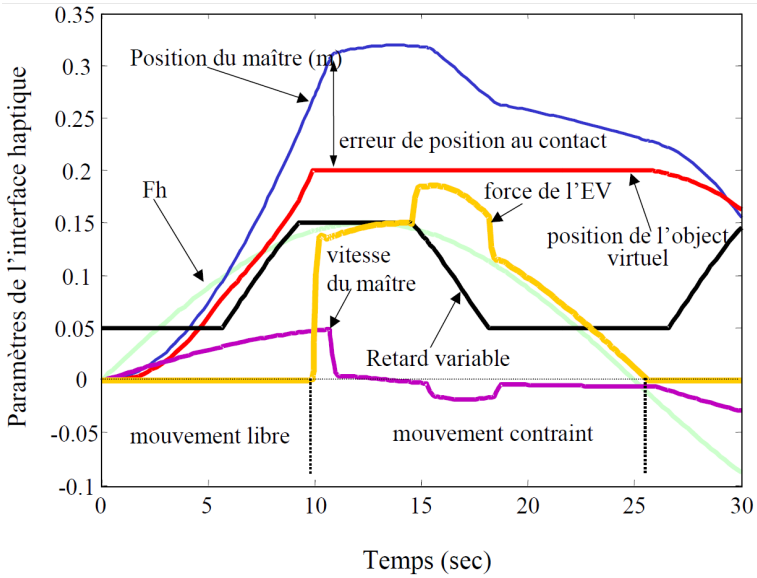

FIGURE 6.17 – *Simulation d'un comportement stable d'une interaction haptique en présence d'un retard variable*

Dans cette simulation, le temps de retard $\tau_1(t)$ varie entre 0,5 *sec* et 1,5 *sec*. Deux types de simulation ont été réalisés :

1. le cas où le retard $\tau_2(t)$ est variable alors que $\tau_1(t)$ est constant ;
2. le cas où les deux retards de transmission varient dans le temps.

Dans le premier cas, la simulation montre un comportement stable. Le comportement obtenu est semblable au cas où $\tau_2(t)$ est constant. Ainsi, la dynamique de $\tau_2(t)$ n'affecte pas la stabilité. Pour ce qui est du deuxième cas, on voit clairement que la dynamique de $\tau_1(t)$ affecte le comportement de l'interaction haptique. Toutefois, la stabilité est toujours préservée. Comme il peut être constaté sur la figure 6.17, la dynamique du retour d'effort est corrélée à celle du retard. Les retours d'effort basculent respectivement entre deux comportements différents correspondant à deux dynamiques du retard de transmission $\tau_1(t)$ (à vrai dire on s'y attendait car, après simplification, l'élément retard reste présent en numérateur de la fonction de transfert obtenue après correction). Même si ces transitions semblent brusques, elles n'affectent pas la stabilité de l'interaction haptique.

Pour mieux comprendre ces changements de comportements, on a superposé trois réponses sur une même figure 6.18 (les positions et les forces sont représentées au même endroit que sur les figures 6.16, 6.17) :

1. les réponses étiquetées par R_1 correspondent au comportement stable dans le cas où les deux temps de retards sont constants ;
2. les réponses étiquetées par R_2 correspondent au cas où le retard $\tau_1(t)$ est défini comme suit :

$$\begin{array}{ll} \tau_1(t) = a & t < 10 \text{ et } t > 22 \\ \tau_1(t) = a + |sin(t - t_i)| & 10 \leq t \leq 22 \end{array} \tag{6.32}$$

où a est la valeur du retard constant et $t_i \approx 10$. La variation du retard a un profil sinusoïdal ;

3. les réponses étiquetées par R_3 correspondent au cas où le retard $\tau_1(t)$ est défini comme précédemment (en R_2) à la différence qu'il redevient constant pour $13 \leq t \leq 18$ *sec*.

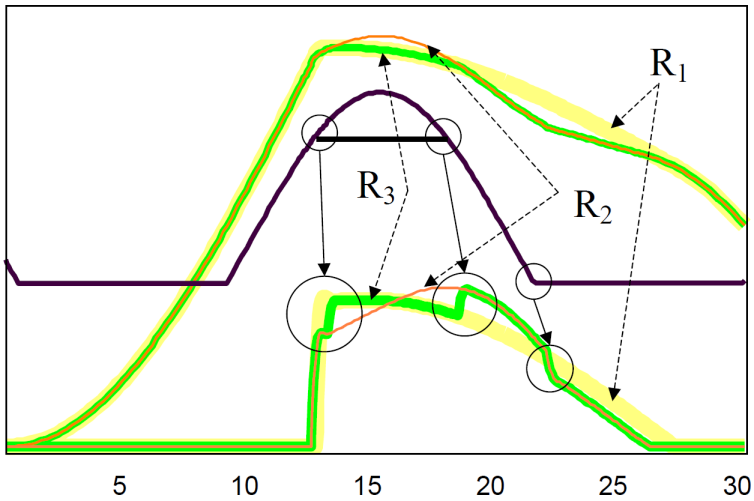

FIGURE 6.18 – *Corrélation entre les comportements du retour de force et le temps de retard* $\tau_1(t)$

Les variations du retard (courbe foncée (noire pour les documents en couleurs)) respectent les conditions de causalité ($1 - \dot{\tau}(t) \leq 1$). On peut remarquer que le comportement du signal retour d'effort et la position du dispositif haptique sont étroitement liés à celui du retard. Les sauts de comportement du signal de retour, entourés par des grands cercles, correspondent au transitions entre un comportement constant et un comportement variable du retard $\tau_1(t)$. A chaque fois, le signal de retour passe d'une "allure" à une autre en fonction du type de retard.

6.3.1.5 Résultats d'expérimentation

Cette partie du chapitre contient les résultats expérimentaux du rendu haptique en présence de retards de transmission [9]. Le site expérimental est composé d'une station de travail type Silicon Graphics SGI^{TM} et d'un dispositif à retour haptique PHANToM^{TM} [51]. Le PHANToM^{TM} est relié à la station de travail via une liaison dédiée. Nous allons maintenant décrire brièvement chaque élément du site expérimental. Nous montrons par la suite les courbes obtenues.

L'environnement virtuel représente un cube dont les parois sont rigides. A l'intérieur du cube se trouve une petite sphère virtuelle que l'opérateur manipule directement via le dispositif haptique. Autrement dit, la position 3D de la sphère est délivrée par le point terminal du dispositif haptique. Le temps de latence entre le dispositif haptique et la station de travail est très petit. Alors, nous avons mis en place deux techniques pour engendrer un retard de transmission ; l'une est dédiée aux retards constants, l'autres aux retards variables :

1. la première technique consiste à utiliser une mémoire tampon pour sauvegarder les données (vitesse, position et force de rendu) pendant un laps de temps que l'on se fixe à priori. Par exemple, si on choisit un retard d'une seconde le programme stocke en mémoire dans une liste circulaire les données. Au début de la simulation la liste

est successivement remplie pendant 1 seconde, par la suite elle est fermée. Pour un élément de la liste donnée, le programme délivre au simulateur (respectivement au dispositif) la donnée retardée et stocke à sa place la donnée qui provient à l'instant du dispositif (respectivement de l'environnement virtuel). Cette structure est valide pour un temps de retard constant ;

2. la deuxième technique concerne les retards variables. Il nous a semblé difficile, mais surtout inutile, d'écrire un programme pour émuler les retards variables. Nous avons fait appel à des collègues de l'université de Munich (Professeur M. Buss), de l'université d'Athènes (Professeur K. Tzafestas) et de l'université de Rio de Janeiro (Professeur A. Neuman), pour avoir un compte utilisateur sur des serveurs sur place. Nous avons alors mis au point un serveur Internet sur la base d'une architecture client-serveur classique. Autrement dit, un programme relais dont le rôle est d'envoyer les données reçues du dispositif (respectivement de l'environnement virtuel) vers l'environnement virtuel (respectivement le dispositif). Le rôle du serveur est d'effectuer une transmission bilatérale des données reçues. Puisque les données transitent sur le réseau Internet (qui est connu pour être non déterministe en temps), elles subiront des fluctuations réelles.

Lorsqu'il n'y a pas de retard, le comportement de l'interaction haptique est stable. L'opérateur ressent la raideur des murs virtuels et peut faire glisser la sphère, avec des caractéristiques de frottement différents, sur les murs. A l'inverse, la figure 6.19 montre le comportement réel d'une interaction haptique avec un retard de transmission constant ($\tau_1 = \tau_2 = 100\ ms$). Comme on peut le constater, en mouvement libre, la sphère virtuelle suit en tout point la trajectoire délivrée par l'opérateur via le dispositif haptique. Cependant, dès lors qu'un contact est établi entre le dispositif et le mur virtuel, le dispositif oscille entre les doigts de l'opérateur. Si l'opérateur persiste à maintenir le contact, l'instabilité est telle que le système d'arrêt automatique du dispositif coupe l'alimentation des actionneurs.

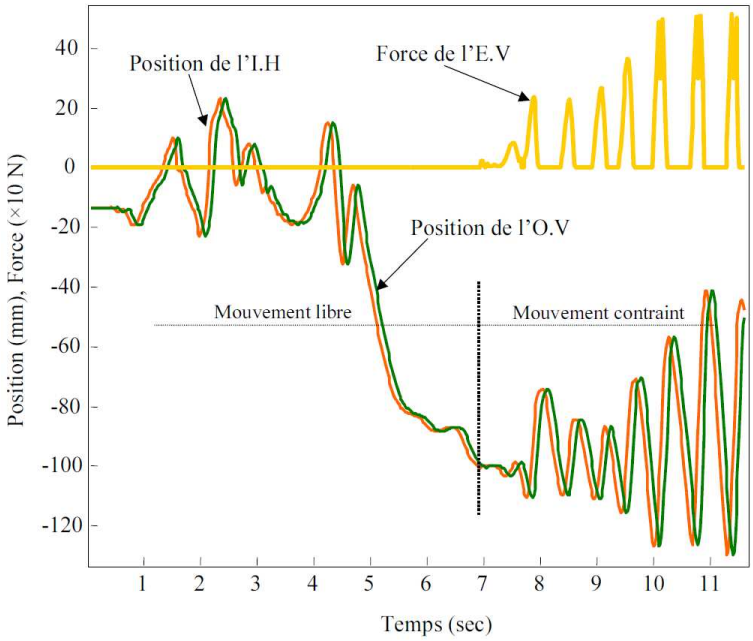

FIGURE 6.19 – *Interaction haptique instable en présence d'un retard constant de 100 msec*

Maintenant, l'interaction haptique est dotée de la loi de commande référencée modèle.

Le résultat de la première simulation, illustré par la figure 6.20, montre un comportement stable de l'interaction haptique avec des temps de retard constants ($\tau_1 = \tau_2 = 100\ ms$). Cette expérimentation a été réalisée avec les mêmes paramètres que la précédente. D'ailleurs, ces paramètres seront gardés pour toutes les expériences décrites dans la suite de cette section afin que la comparaison ne soit pas biaisée.

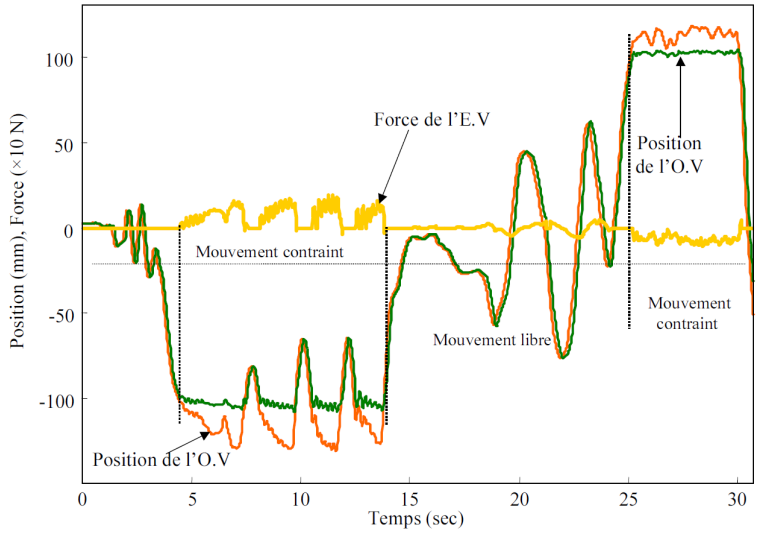

FIGURE 6.20 – *Interaction haptique stable en présence d'un retard constant de $\tau_1 = \tau_2 = 100$ msec*

Comme on peut le constater, la commande référencée modèle assure la stabilité de l'interaction haptique. Dans ce cas d'exemple, les erreurs d'estimation des paramètres du dispositif haptique sont supposées minimes. L'erreur de position durant le contact ne dépasse pas les 4 *cm* et peut être réduite par la seule volonté de l'opérateur (si les mouvements à l'approche du contact ne sont pas trop rapides). Il faut noter que ces écarts peuvent augmenter si l'opérateur applique une force trop importante sur le dispositif haptique. En fait, l'expérimentateur perçoit une raideur inversement proportionnelle à la taille du retard.

D'autres types de contact et tailles de retards constants ont été testés. Le comportement reste toujours stable. Cependant, on peut constater que si le retard est trop important ou lorsque la main de l'opérateur se déplace rapidement, on risque d'atteindre les limites de l'espace de travail du dispositif avant de ressentir la force de réaction de l'environnement virtuel. Dans ces conditions l'interaction haptique est impraticable et ce, quelle que soit la commande utilisée. Toutefois, après quelques essais, on a remarqué que les expérimentateurs s'adaptent au retard et ont tendance, intuitivement, à effectuer des déplacements plus lents.

Les expériences qui suivent concernent le cas de retards variables. Plusieurs essais ont été réalisés sur Internet, connu pour être non déterministe en temps de transmission. Nous avons implanté des relais sur des serveurs se trouvant à Berlin, Athènes et Rio de Janeiro. Il ne s'agit pas ici de relater toutes les expériences ; nous ne présenterons que les résultats obtenus avec Berlin.

En activant le correcteur, on peut constater, figure 6.21, un comportement stable de l'interaction haptique en présence d'un retard variable. On peut déjà faire deux remarques :

1. la première concerne l'erreur de position au contact qui est indépendante de la

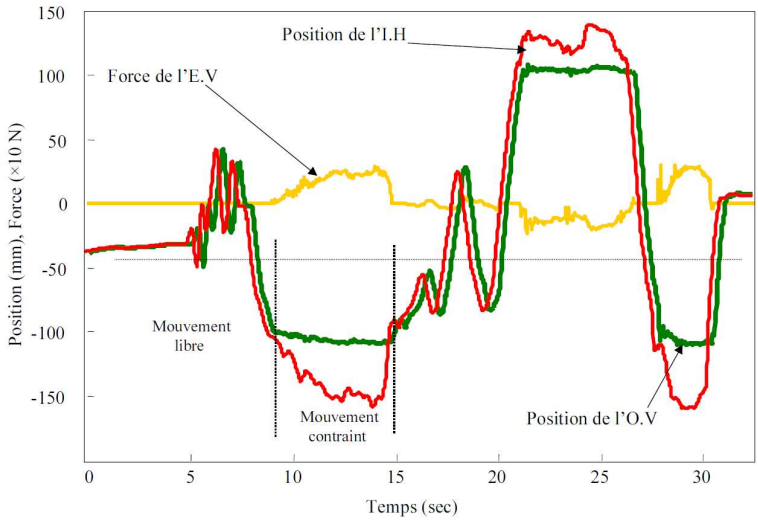

FIGURE 6.21 – *Interaction haptique à temps de retard variable via Berlin*

fluctuation du retard. Par contre, elle dépend fortement de la valeur de ce dernier au moment du contact ;

2. la deuxième concerne l'apparition de quelques oscillations perceptibles quand l'opérateur tient mollement le dispositif, ces oscillations rappellent les sauts de comportement sur la force F_e rencontrés en simulation. Comme le retard fluctue beaucoup, ces petites oscillations sont fréquentes. Une solution très simple consiste tout simplement à filtrer la force reçue du côté de l'opérateur.

Des résultats semblables ont été obtenus avec Athènes et Rio de Janeiro. Par contre, la fluctuation du retard entre la France et le Brésil était plus importante. Nous avons été confrontés au problème de pertes de données et de blocage, problèmes que l'on n'a pas traité pour l'instant.

Nous avons aussi expérimenté la robustesse de l'approche ainsi que les apports ajoutés pour améliorer les approches à base d'ondes. Les résultats confortaient à chaque fois la théorie. Des estimations qui s'éloignent des valeurs établies, jusqu'à sortir des marges envisagées pour chaque paramètre, entraînaient systématiquement des pertes progressives de performances jusqu'à ce que l'instabilité soit atteinte. On peut toutefois dire que les marges sont plus petites que celles que nous avons trouvées en théorie.

6.3.2 Apports aux approches passives

Un autre volet de ce travail concerne deux améliorations apportées au contrôleur passif utilisant les variables d'ondes. L'idée de base était de voir si une prédiction dans l'espace des ondes pouvait permettre d'étendre les approches à base d'ondes au cas du retard variable sans trop modifier leur structure d'implémentation.

Dans un premier temps, on s'est rendu compte que ce que nous envisagions a été entrepris par Saghir et Book [118]. Leur méthode consiste à introduire une prédiction dans le domaine des ondes. Cette prédiction est aussi inspirée de celle proposée par Smith et est combinée à un filtre de Kalman et à un régulateur d'énergie. Le prédicteur proposé dans Saghir s'écrit ainsi :

$$G_p(s) = (1 - e^{s(\tau_1+\tau_2)} G_r(s) \tag{6.33}$$

où G_r est le transfert combiné du modèle du robot et des transformations en variable d'onde côté esclave. Le prédicteur est implémenté du côté du maître, après les transformations des paramètre flux et effort en variable d'onde et avant l'envoi et la réception des ondes, c'est-à-dire avant le média de communication. L'objectif principal de l'approche proposée est dans l'amélioration des performances, notamment la réduction des écarts entre les dispositifs maître et esclave tout en maintenant la passivité du système.

L'efficacité de cette méthode repose toutefois sur une bonne estimation du transfert G_r. Pour les raisons que l'on n'a pas cessé d'évoquer, notamment en téléopération, prétendre pouvoir estimer efficacement $G_r(s)$ ne relève que de la théorie. En pratique, si l'on connaît les modèles de transformation que subiront les paramètres flux et effort (ce qui pourrait permettre de les prédire), il est difficile d'estimer le modèle d'interaction entre le robot et son environnement. On rappelle qu'il est dans ce cas nécessaire de savoir quand la collision va avoir lieu et avec quelle dynamique.

Dans le même esprit que l'approche qui nous a permis de développer notre correcteur, on effectue la même démarche en implémentant le correcteur dans le domaine des ondes mais en gardant le même schéma que celui de la figure 6.12. A l'inverse de ce qui a été développé dans [118], la prédiction concerne la partie : dispositif haptique. Le filtre de Kalman, le régulateur de passivité et l'estimation des retards $\tau_i = 1,2$ ne sont plus nécessaires dans notre amélioration des variables d'ondes [8].

6.4 Application : Téléopération d'un robot mobile pour l'assistance aux personnes âgées

Suite aux succès et à la propagation des dispositifs de rendu d'effort à bas-coût, l'utilisation des interfaces haptiques est grandissante et ces dispositifs apparaissent dans de nombreux domaines tel que la robotique. Récemment, ces dispositifs ont été exploités dans le domaine de la téléopération de robots mobiles. Ces robots opèrent généralement dans des environnements inconnus et/ou dangereux. Dans ce contexte, le retour haptique peut s'avérer très utile et est sensé améliorer la perception de l'environnement chez l'opérateur humain.

Les robots mobiles téléopérés constituent un outil important dans l'exploration des environnements inconnus et risqués. Robots démineurs [119] ou robots explorateurs des structures sous-marines [120] sont deux applications courantes. Cependant, les mouvements de ces robots mobiles sont habituellement contrôlés par des opérateurs humains à l'aide de capteurs passifs, tels que la caméra. Bien que les systèmes de vision fournissent beaucoup d'informations sur l'environnement à explorer, ils exigent une bande passante réseau assez élevée ainsi que l'attention de l'opérateur.

Pour surmonter ces problèmes, les dispositifs haptiques ont été récemment introduits dans le domaine de la télérobotique afin de renforcer la perception de l'environnement chez les opérateurs. Ils offrent aux utilisateurs l'illusion de "sentir" l'espace de travail du robot mobile, le rendant, entre autres, ainsi plus apte à éviter les obstacles en réduisant le nombre de collisions [121, 122, 123].

Dans cette section, nous présentons un système de téléopération d'un robot mobile utilisé pour l'assistance aux personnes à mobilité réduite.

6.4.1 Contexte et cadre du travail

Le maintien à domicile des personnes âgées atteintes de troubles cognitifs requiert des moyens de télévigilance afin d'assurer la sécurité de la personne et la possibilité de stimuler cognitivement la personne pour l'aider à conserver son autonomie. Des moyens de détection de ces situations alarmantes et de stimulation cognitive commencent à exister, mais ils se heurtent encore à des problèmes de fiabilité et d'efficacité principalement dus à l'éloignement des personnels soignants.

Le laboratoire IBISC est investi dans un projet européen, CompanionAble, visant à développer un support de stimulation cognitive et de gestion de la thérapie pour ces personnes. Il sera construit autour d'un robot mobile compagnon en relation avec un environnement de type habitat intelligent. Dans le cadre de ce projet, nous proposons de donner à l'opérateur distant (personnel soignant ou de télévigilance) un moyen d'interaction avec la personne à domicile sous la forme d'une commande à distance du robot mobile semi-autonome. Les premiers résultats ont été soumis à publication dans deux congrès [15] et [16].

Le travail amorcé par M. Zheng DAI, dans le cadre d'un contrat post-doctoral, consiste principalement en la mise en place d'une architecture de simulation haptique afin de permettre à l'opérateur distant d'entrer en interaction avec le patient par l'intermédiaire du robot d'assistance. Cette distance opérateur-robot sous-entend un temps de transmission, parfois non négligeable, pouvant rendre l'interaction homme-machine instable ou du moins non praticable. Les approches de stabilisation utilisées se basent exclusivement sur les travaux précédemment détaillés. Une deuxième partie du travail, réalisée par M. Lounis Temzi (stagiaire Master2 RVSI), consiste en la reconstruction en ligne, à partir de capteurs proprioceptifs du robot mobile, de l'environnement dans lequel évolue le robot. Malheureusement, cette partie a subi beaucoup de retard et devra être reconsidérée prochainement.

6.4.2 Schéma de commande

Le schéma de commande position-force (voir section 6.1.2.2 pour plus de détails) est de loin le plus approprié à notre application. Ceci est motivé par le type d'interface haptique utilisée ainsi que le protocole de transfert de données (entrées/sorties) du robot ARPH/LINA.

Par ailleurs, une modification a été apportée au modèle de commande qui consiste à utiliser la position du dispositif haptique comme étant une consigne de vitesse (linéaire et angulaire) pour le robot distant. Par conséquent, l'interface haptique émulerait le rôle d'un joystick. L'interface haptique reçoit un rendu de force calculé à partir des données des capteurs UltraSon implémentés sur le front du robot mobile.

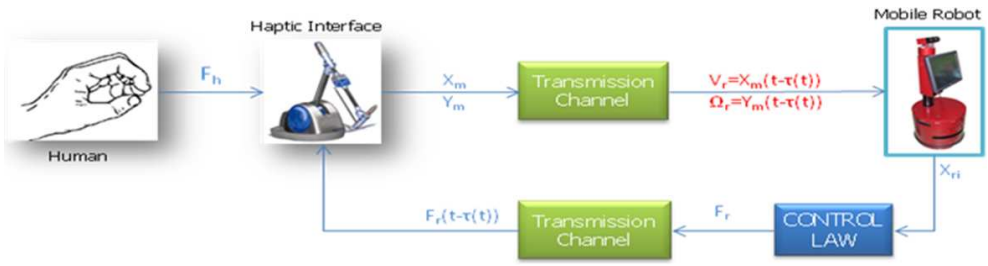

FIGURE 6.22 – *Schéma simpliste de la mise en œuvre.*

La figure 6.22 met en évidence notre schéma de commande. En effet, l'opérateur humain (F_h) manipule l'interface haptique afin de faire bouger le robot mobile distant. Les mouvements effectués par l'opérateur sera traduit par une consigne de vitesse linéaire V_r ou angulaire Ω_r du robot. Des homothéties sont appliquées entre les différentes grandeurs afin de régler au mieux le mouvement du robot, telle que :

$$\begin{cases} V_r = k_V \cdot X_m(t - \tau(t)) \\ \Omega_r = k_\Omega \cdot Y_m(t - \tau(t)) \end{cases} \tag{6.34}$$

Où : V_r et Ω_r sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire du robot mobile. k_V et k_Ω sont les homothéties appliquées respectivement aux deux déplacements $X_m(t - \tau(t))$ et $Y_m(t - \tau(t))$. $\tau(t)$ est le temps de retard de communication qui peut fluctuer tout au long de l'expérimentation.

6.4.3 Stratégie du rendu d'effort

Le retour de force est calculé à partir des X_i représentant les différentes distances entre les obstacles et le robot mobile. Ces distances sont mesurées par les 7 capteurs ultrasons placés à l'avant du robot mobile, figure 6.23. Le déphasage entre chaque capteur est de 30°.

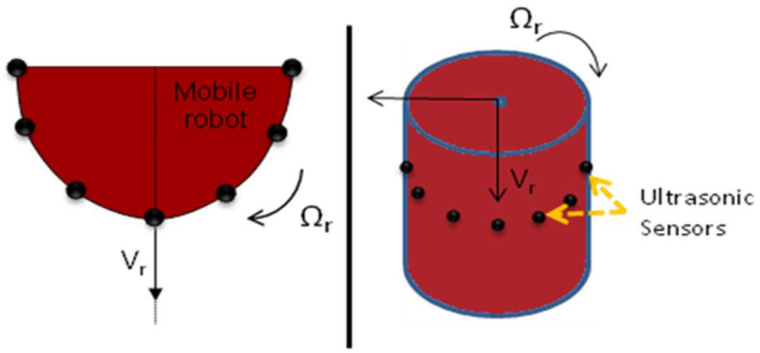

FIGURE 6.23 – *Configuration des vitesses et implémentations des capteurs ultrasons*

Afin de calculer la force nécessaire pour alerter l'opérateur humain sur la présence d'un obstacle ou sur un choc imminent, nous avons définit deux seuils de distances à partir desquels l'opérateur ressent deux niveaux différents de forces (figure 6.24). Ces deux niveaux sont définis comme suit :

$$\begin{cases} X_{wall} \leq X_i \leq X_{spring} \rightarrow F_i = k_s(X_i - X_{spring}) \\ 0 \leq X_i \leq X_{wall} \rightarrow F_i = k_w(X_i - X_{wall}) + k_s(X_{spring} - X_{wall}) \end{cases} \tag{6.35}$$

Où X_{spring} est le premier seuil limitant la zone ressort, X_{wall} est le deuxième seuil limitant la zone mur, k_w et k_s sont des raideurs synthétisées en fonction des propriétés physiques à reproduire.

Le retour de force, F_r, est synthétisé comme suit :

$$\vec{F_r} = \sum_{i=0}^{6} \vec{F_i} \tag{6.36}$$

Par projection, nous obtenons :

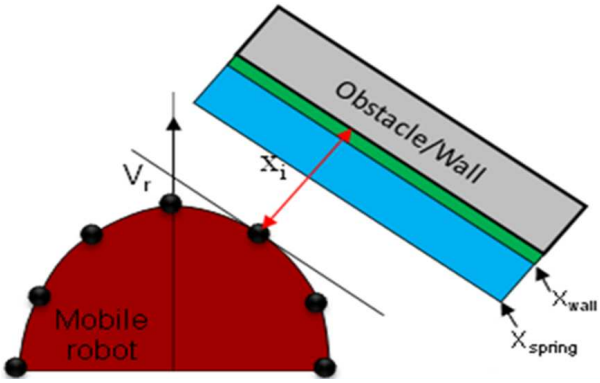

FIGURE 6.24 – *Seuils de distances entre le robot mobile et un obstacle.*

$$\begin{cases} F_{r/x} = F_1 sin(\frac{\pi}{6}) + F_2 sin(\frac{\pi}{3}) + F_3 - F_4 sin(\frac{\pi}{3}) - F_5 sin(\frac{\pi}{6}) \\ F_{r/y} = F_0 + F_1 cos(\frac{\pi}{6}) + F_2 cos(\frac{\pi}{3}) - F_4 cos(\frac{\pi}{3}) - F_5 cos(\frac{\pi}{6}) - F_6 \end{cases} \tag{6.37}$$

6.4.4 Effet joystick

Pour des raisons de sécurité et afin de préserver le robot mobile, nous avons intégré une commande $F_{0/(x,y)}$ (force de rappel) permanente afin qu'elle repositionne le bras haptique sur sa position/zone neutre. Cette propriété est importante dans le cas où l'opérateur lâche le bras, l'effecteur retrouve rapidement la position neutre et le robot mobile stoppe sa progression.

$$F_{0/(x,y)} = -k_0 X_m \tag{6.38}$$

Où k_0 est une faible raideur permettant une force de rappel sur l'interface sans toutefois contraindre l'opérateur.

Une position/zone neutre a été définie afin de préserver la durée de vie des moteurs du robot mobile contre les petites commandes parasites dues au tremblement de la main.

FIGURE 6.25 – *Robot LINA*

6.4.5 Résultats Expérimentaux

Toutes les expérimentations ont été réalisées sur un robot mobile réel. Lina (figure 6.25) est un robot mobile circulaire (55 cm de diamètre) à deux roues. Ses vitesses maximales (linéaire et rotation) sont respectivement de $1,2\ ms^{-1}$ et $4\ rds^{-1}$. Les codeurs optiques des moteurs sont utilisés pour l'odométrie (calcul local de la trajectoire). Par ailleurs, Lina est équipé de 12 capteurs ultrason déphasés de 30°. Dans le cadre des présentes implémentations, nous n'avons utilisé que les 7 capteurs frontaux. Les indices x_0 à x_6, représentent les distances récupérées par les capteurs de gauche à droite. Du coté utilisateur, nous avons utilisé un bras Phantom Omni de la société Sensable.

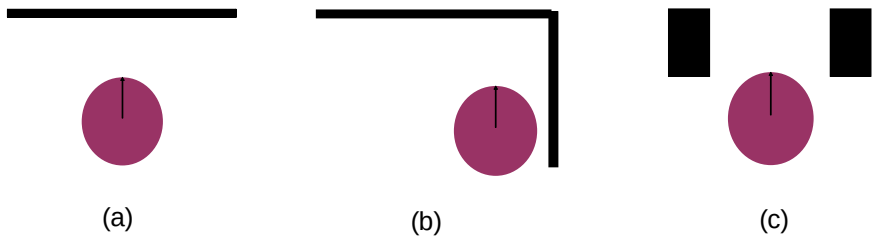

FIGURE 6.26 – *Situations classiques rencontrées au sein d'un environnement d'intérieur.*

Nous avons validé notre modèle de commande et la stratégie du retour d'effort dans diverses situations que l'on peut rencontrer dans les environnements intérieurs : suivi d'un mur, déplacement vers un obstacle et franchissement des portes (passage entre deux obstacles), Figure 6.26. Pour chacune de ces expérimentations, 4 situations de rendu haptique ont été testées. Dans la première situation "SE", aucune force n'est rendue à l'opérateur. Cette situation constitue une base de comparaison avec les différents cas restants. Dans la seconde situation "SR", nous avons accompli des expérimentations classiques avec rendu d'effort et sans retard de transmission (Figure 6.27). Dans la troisième situation "RNC", un retard de communication est introduit sans commande stabilisante (Figure 6.28). La dernière situation "RC", correspond à une compensation du retard par des approches prédictives (Figure 6.29).

Quatre sujets, âgés de vingt-cinq à trente ans, ont pris part aux expérimentations. Ils sont doctorants au laboratoire, donc familiers avec les robots mobiles et la téléopération, mais pas avec un joystick type Phantom Omni. Les sujets ont une vingtaine de minutes pour se familiariser avec le rendu haptique. Cet apprentissage a été mené sans retard de transmission.

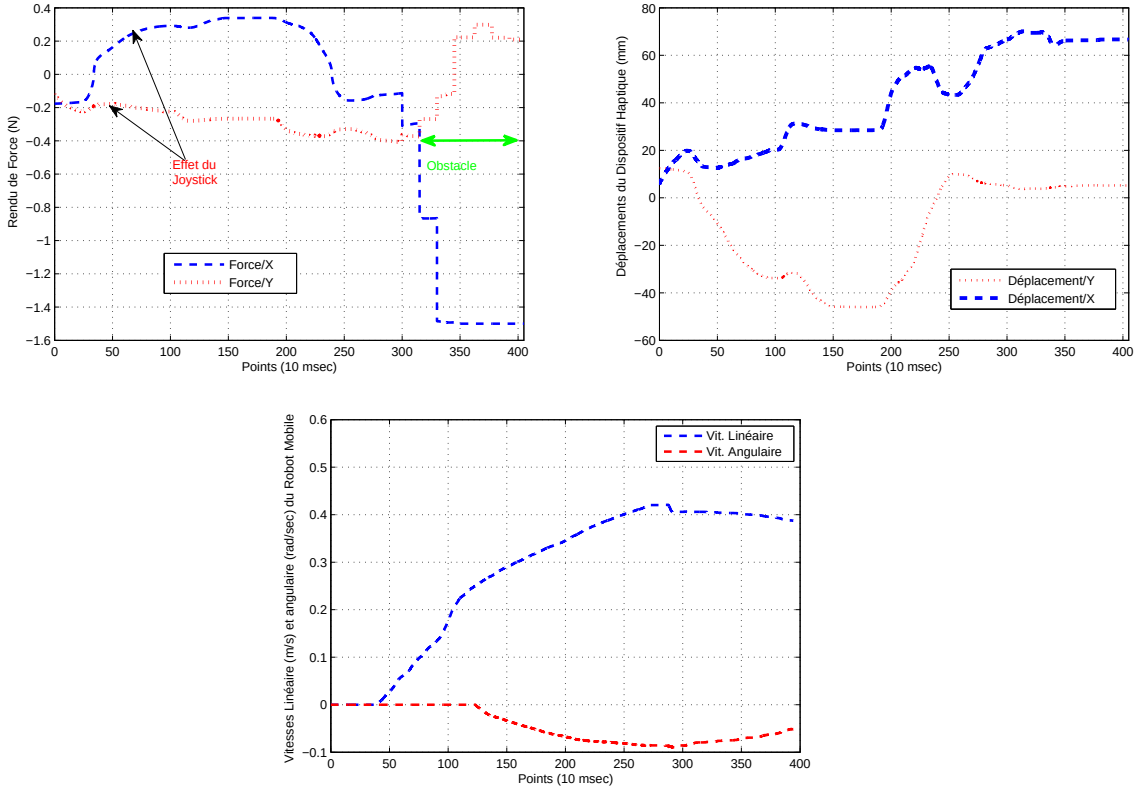

FIGURE 6.27 – *Robot Mobile face à un mur $\tau_i = 0$: (a) Rendu de forces, (b) Déplacements du dispositif and (c) Vitesses linéaire et angulaire du Robot Mobile*

Les Figures 6.27 illustrent le comportement de l'interaction haptique dans des conditions idéales (sans retard). L'opérateur humain commande le robot mobile pour se rapprocher d'un mur. Nous constatons au début de l'expérience une faible force correspondant à l'effet joystick, nécessaire pour la remise à la position neutre du dispositif haptique. Nous remarquons également que le retour de force est modulé en fonction de la distance entre le robot et l'obstacle (selon x_i, x_{spring} et x_{wall}).

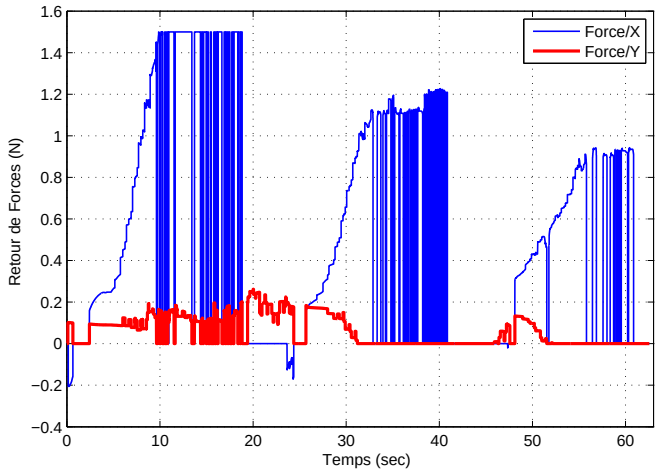

FIGURE 6.28 – *Robot Mobile approchant un mur avec un retard de $\tau_i = 100ms$*

Dans la Figure 6.28, on peut remarquer un comportement instable du rendu haptique au cours d'une même expérience que la précédente. Mais, les retards sont ici de 100*msec* (aller-retour). Du fait des vibrations transitoires, l'opérateur ne peut pas se constituer une idée claire sur l'évolution du robot mobile.

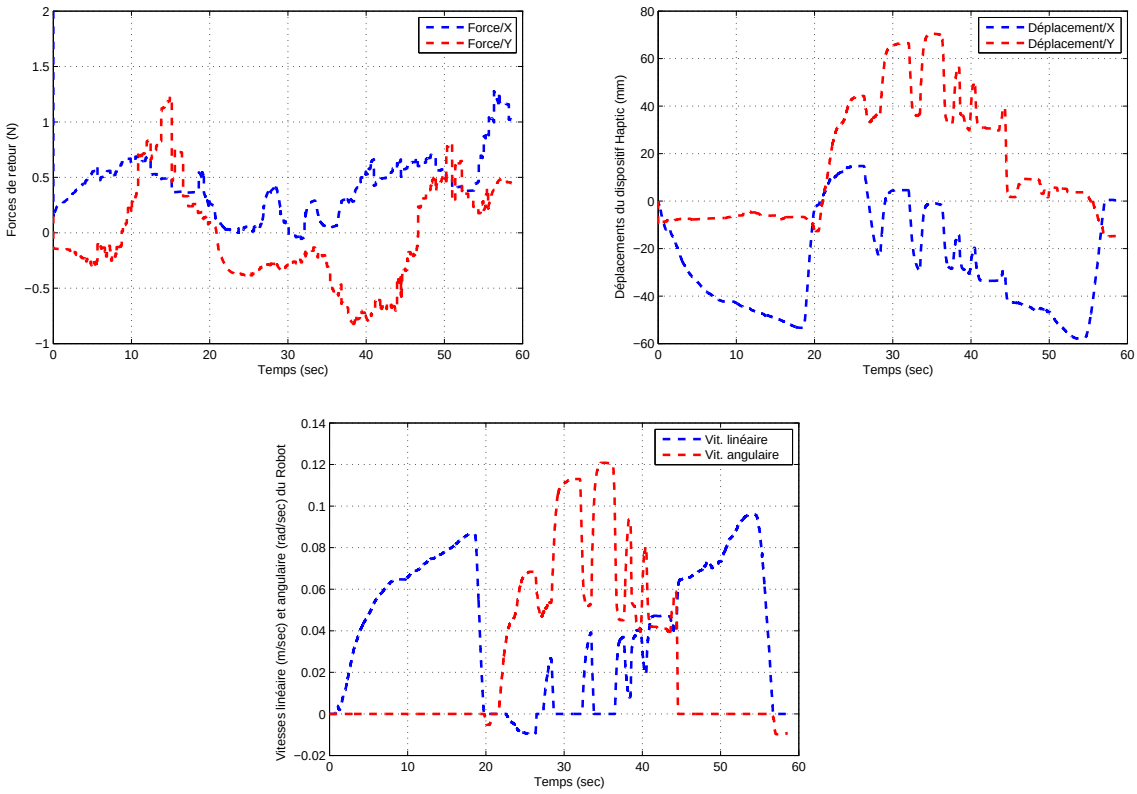

FIGURE 6.29 – *Robot Mobile se faufilant entre deux obstacles sous un retard de $\tau_i = 200msec$: (a) Rendu de forces, (b) Déplacements du disposotif and (c) Vitesses linéaire et angulaire du Robot Mobile*

Les Figures 6.29 présentent l'évolution du robot mobile naviguant dans un environnement complexe. L'objectif est de pouvoir faire se faufiler le robot mobile entre deux obstacles. L'expérience est réalisée avec un retard $\tau_i = 200msec$. Les courbes montrent un rendu de force stable. Mais du fait d'un retard important et une commande en vitesse du robot mobile, les opérateurs se sentent obligés de ralentir ou adapter leur commande pour passer entre les obstacles sans les heurter. Cette difficulté décroit avec un apprentissage de 15 minutes. Pour cette raison, nous souhaitons définir des paramètres pertinents (temps de réalisation de la tâche, complexité de la tâche, etc.) pour la bonne exécution d'une quelconque opération.

6.4.5.1 Analyses et Discussions

Nous avons pris en compte trois critères statistiques pour analyser ces expériences du point de vue de l'opérateur :

1. Temps de réalisation de la tâche ;
2. Variation de la force ;
3. Variation de la commande.

Considérant ces trois critères statistiques, on peut constater qu'il n'est pas très facile de conclure sur l'aide apportée par le rendu haptique dans la téléopération du robot mobile. En effet, le temps d'exécution d'une mission n'est pas sensiblement meilleur avec ou sans rendu haptique, même en l'absence des retards de transmission. Le même constat est fait pour les forces rendues. Ceci peut être expliqué par le schéma de commande utilisé (*vitesse-force* utilisant la position du dispositif haptic en tant que consigne) considéré comme peu intuitif pour la plupart des utilisateurs. Par exemple, si l'opérateur fixe la position du dispositif, le robot mobile peut toujours avancer. En revanche, le troisième critère "*variation de la commande*", montre une différence significative du comportement de l'utilisateur donnant un avantage clair pour l'utilisation du rendu d'effort.

Par ailleurs, nous avons demandé aux utilisateurs de donner leur sentiment sur les expérimentations (un protocole de questions très simple). Dans le cas où le robot mobile approche un mur, le rendu de force n'est pas jugé très utile puisque la vision (si elle est optimale) donne de bons résultats. Dans les autres situations, le retour haptique semble être très apprécié puisqu'il permet de percevoir des informations de l'environnement que l'on ne voir à travers le flux vidéo. Dans ces cas, les délais de transmission perturbent gradement les utilisateurs s'ils ne sont pas corrigées.

6.5 Application : Rendu haptique distribué

6.5.1 Problématique

Le sens haptique devient de plus en plus populaire dans les applications de réalité virtuelle suite à l'arrivée de dispositifs à retour d'effort variés, pas chers, compacts et faciles d'usage. Par le biais de ces dispositifs, les utilisateurs peuvent manipuler des objets virtuels et coopérer avec d'autres opérateurs au sein d'un même environnement de synthèse. Relier les applications de RV par l'intermédiaire de réseaux de communication permet ainsi des collaborations à distance dans des domaines d'applications très variés :

- Prototypage virtuel
  - ◇ Ingénierie concourante
  - ◇ Montage/démontage d'éléments mécaniques
  - ◇ Télémaintenance industrielle
- Entraînement et perfectionnement du geste dans le domaine médical
  - ◇ Téléchirugie
  - ◇ Télé-échographie
  - ◇ Entraînement à l'accouchement (i.e. manipulation des Forceps)
  - ◇ Endoscopie

La collaboration haptique s'avère très utile pour le gain de temps (réalisation, étude, essais) ou plus généralement pour la réduction des coûts de développements et/ou d'apprentissage sur maquettes virtuelles, etc.

Par ailleurs et afin de garantir une stabilité optimale et une transparence acceptable, les simulations à retour kinesthésique nécessitent une bande passante relativement élevée, idéalement 1 kHz.

Dans ce cadre, je me suis intéressé à l'étude des interactions haptiques collaboratives en utilisant des techniques de réalité virtuelle (RV) et le développement de technologies permettant la transmission de données multi-sensorielles. Pour se faire, nous avons étudié ce que peut engendrer l'augmentation du déploiement de ce type d'applications. Le

premier défi à relever réside dans la question suivante : Comment peut-on fournir une connexion adéquate entre les applications haptiques distribuées sachant que les diverses données sensorielles (sonores, visuelles, tactile, kinesthésique, ...) ainsi que les commandes doivent être envoyées de manière synchrone au travers du média de transfert ? Si nous prenons l'exemple d'Internet, il constitue un moyen très adapté pour "relier" l'ensemble des sites distants du fait de sa popularité et de sa rentabilité. Même si les actuels protocoles de communication (i.e. TCP/IP) sont les plus utilisés, ils ne sont pas conçus pour des applications temps réel et par conséquent les transferts de données souffrent de retards, de pertes d'informations et de congestions imprévisibles de réseaux, etc.

Nous avons donc posé la problématique qui est celle de l'économie et de la gestion "optimale" des ressources disponibles une application distribuée. Cette problématique s'articulera autour de deux axes principaux :

- Etude de la fidélité du rendu haptique : l'objectif de cet axe est de permettre une meilleure définition du retour haptique pour que ce dernier soit ;
  - ◇ Significatif : avoir une cohérence entre les informations vues et ressenties ;
  - ◇ Utilisable : proposer des schémas de commande suffisamment stables, quelques soient les informations sensorielles rendues. Une même scène peut en effet transmettre des informations visuelles, de température, de texture ou d'effort ayant des spécificités matérielles (hétérogénéité des interfaces) ou sensorielles (bandes passantes différentes).
- Architecture logicielle de collaboration
  - ◇ L'objectif de cet axe est d'étudier l'organisation logicielle des communications ainsi que de proposer des architectures adaptées à la problématique posée. Le défi le plus important réside dans la gestion des ressources disponibles aux niveaux des postes-opérateurs [83].

La plate-forme que nous voulons développer se voulait générique et pouvant être partagée. Nous avons donc développé des outils tels que l'enveloppe de latence qui aide à la création d'un serveur intelligent et la sphère de proximité dont le rôle principal sera l'économie de la ressource en local, résultats publiés dans [14].

Dans la suite, j'aborderai la démarche que j'ai entreprise et les approches développées.

6.5.2 Etat de l'art

Dans la littérature, on retrouve de multiples simulations haptique partageant des environnements virtuels entre plusieurs opérateurs, généralement, au sein d'un réseau local. Ce dernier type de liaison induit un retard de communication très faible n'affectant pas la stabilité de la simulation. Le principal but de ces recherches est de quantifier l'impact des caractéristiques des lignes de transmission ou l'impact des délais sur la cohérence visio-haptique. Des études ont montrés qu'à partir d'un certain seuil (40 *ms*), le retard affecte la perception de l'utilisateur [124].

Par ailleurs, des chercheurs ont exploré l'apport du rendu haptique dans une simulation qui améliore sensiblement les performances de la tâche à accomplir et augmente la présence de l'opérateur au sein des environnements synthétiques. Les résultats sont positifs et attestent de l'importance du rendu haptique dans les environnements collaboratifs [125].

Un autre groupe de chercheurs se sont intéressés à l'architecture de communication en introduisant les problèmes dus à une telle technologie, à savoir le délai qui affecte

la stabilité de la simulation. Ils ont exploré plusieurs scénarios d'environnement virtuel distribué : statique où les clients ne peuvent pas modifier l'environnement virtuel, mais seulement une personne à la fois, où les clients font une tâche l'un après l'autre comme dans un jeu de tennis par exemple et enfin collaboratif simultané où les clients peuvent simultanément exercer une tâche donnée, comme le déplacement d'un objet. Le dernier scénario a posé de nombreuses contraintes techniques ce qui a conduit à plusieurs travaux de recherches encore naissants [126, 82]. D'autres nouvelles pistes basées sur l'amélioration de l'infrastructure et la Qualité de service "QoS" ont vu récemment le jour. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à mes deux chapitres de livres, [11, 13].

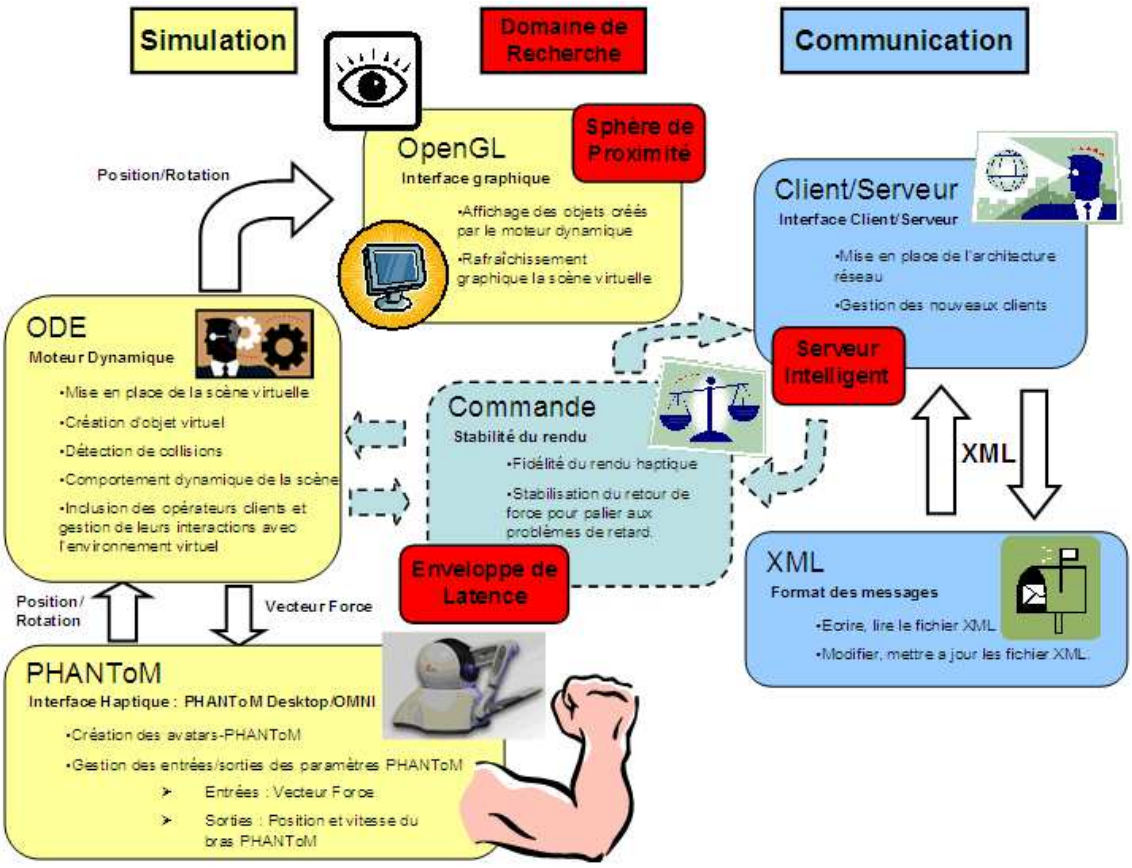

FIGURE 6.30 – *Organigramme de la plate-forme de simulation.*

6.5.3 Présentation de la plate-forme de simulation

Une plate-forme de simulation a été développée, durant le stage de M. Karim Tourbah (étudiant en DEA RVMSC), en langage C++ sur le framework .NET. Elle s'articule sur trois grands axes :

a) la simulation dynamique des objets virtuels : Cette partie est composée de trois principaux modules :
   – Le moteur dynamique ou physique : faisant appel aux principes de la dynamique connus pour animer de manière intuitive et rapide la scène virtuelle figure 6.31. Il met en place un environnement virtuel, créé les objets virtuels et s'occupe du

comportement dynamique des objets qui évoluent au sein de cet environnement. Il a en charge aussi la détection de collisions entre les objets et la résolution du contact (notamment le renvoi de la force à l'opérateur). Par souci de réduction de temps et aussi la simplicité de mise en œuvre, les librairies ODE[3] (Open Dynamics Engine) ont été sélectionnées pour l'implantation du moteur dynamique. Elles sont disponibles librement sur le site http ://www.ode.org/.

– L'interface graphique est l'organe visuel de la simulation haptique. Elle affiche les objets créés par le moteur dynamique et s'occupe du rafraîchissement graphique de la scène virtuelle. La librairie "OpenGL" a été utilisée pour mettre en place cette interface graphique. Cette partie est scindée en deux principales parties :
  - ◇ L'interface Client/Serveur est un protocole de communication et de transfert de données de et vers la simulation. Il représente l'architecture réseau du système et prend en charge la gestion des nouveaux clients ou collaborateurs. Il est aussi le "centre de commandement" du serveur intelligent.
  - ◇ Le module XML. Ce langage a été choisi pour le format des informations transmises entre les différentes machines clientes du système. L'objectif initial de XML était de faciliter le partage de textes et d'informations structurés, par exemple au travers de l'Internet, en séparant le contenu (les données) du contenant (la présentation des données). Il a été établi avec l'intention d'être un format compréhensible par l'homme et la machine. Par exemple, le serveur enverra ainsi à tous les clients, un fichier unique duquel chaque client pourra extraire les informations le concernant qu'il trouvera sous la balise donnant son identité unique. De plus, il pourra, avec un même fichier, se renseigner sur la situation des autres clients.

– L'interface mécatronique : son rôle a été abordé précédemment.

b) l'architecture de réseau de communication ;

c) l'automatique du rendu haptique.

Chacun de ces trois axes se divise en plusieurs modules indépendants comme illustré par la figure 6.30.

6.5.4 Architecture de communication et gestion de ressources

6.5.4.1 Serveur Intelligent

Une architecture de réseau adaptée doit être choisie de façon à mieux gérer les ressources disponibles lors de la simulation dynamique. Plusieurs cas de figures se présentent à nous dans le cadre de cette architecture réseau pour une simulation haptique collaborative distante. Nous avons investigué plusieurs architectures faisant appel au protocole client/serveur où les deux "postes" jouent un rôle plus ou moins important, à savoir :

1. Client/Serveur où le serveur joue le rôle d'un centre de calcul et donne les priorités ;

3. ODE est un ensemble de sources "open librairies" très performant pour simuler la dynamique des objets virtuels rigides. Elles sont indépendantes des différentes plates-formes utilisées et intègrent une API (Application Program Interface) en C/C++, ensemble d'outils utile à la conception des programmes sous C/C++. Ces librairies comportent des systèmes de détections de collisions avec ou sans frottement. A chaque pas de temps, les objets en collision sont détectés et les points de contacts renvoyés à l'utilisateur. Un algorithme personnalisé de détection de collisions peut être implémenté tant que les sorties sont conformes aux spécifications de ODE. ODE est utilisée dans la simulation de véhicules, d'objets ou de créatures virtuelles dans des environnements de synthèse.

FIGURE 6.31 – *Environnement de la plate-forme de simulation.*

2. Client/Serveur avec un maximum de traitement qui se fait au niveau du client ;
3. Client/Client : architecture point à point (P2P). Chaque poste peut être considéré comme client et/ou serveur.
4. Client/Serveur : une architecture mixte où le rôle du serveur pouvant éventuellement être joué par un client si besoin est.

Cette dernière mise en œuvre a été choisie du fait de sa capacité à surmonter les dégradations de performances (manque de ressources) de l'un ou l'autre.

Dans cette architecture, le moteur dynamique est présent au niveau des clients et du serveur où ce dernier gère les ressources disponible. Il constitue, au même temps, un médiateur entre les clients, ayant pour tâche, entre autres, d'optimiser au maximum la communication entre les clients, quelque soit la situation. Le serveur renseigne notamment les clients des mises à jour des états des différents clients et décide des ressources à allouer à chaque poste distant.

Ce type de scénario peut sembler idéal à condition de se doter d'un serveur capable de gérer et d'optimiser au mieux les ressources présentes. Pour cela, plusieurs outils ont été développés afin d'aider le serveur ayant une meilleure connaissance de la scène virtuelle et ainsi prendre les meilleures décisions possibles.

6.5.5 Architecture Techniques basées sur le principe de l'enveloppe englobante

6.5.5.1 Gestion des ressources informatiques

Dans une scène virtuelle où plusieurs opérateurs clients coopèrent, deux cas distincts de délais peuvent apparaître : (1) le délai de communication et (2) le délai dû au traitement propre de l'information (animation graphique, etc.). Dans le premier cas, les problèmes causés sont la stabilité et la fidélité du rendu visio-haptique. Des approches de commande classique sont un "remède" efficace pour surmonter ces difficultés. Pour le deuxième cas, les problèmes qui en découlent sont liés au "gaspillage" des ressources disponibles. Un client pourrait avoir beaucoup de ressources et n'en utiliser que peu alors qu'un autre

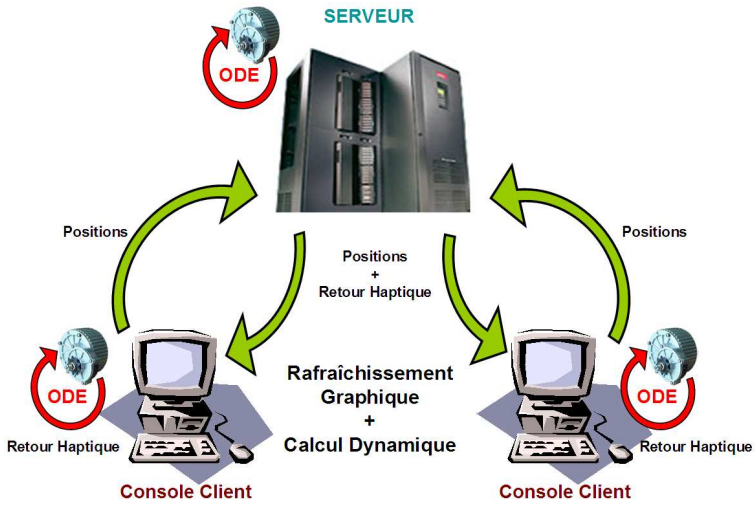

FIGURE 6.32 – *L'architecture Client/Serveur mixte.*

pourrait avoir moins de ressources qu'il n'en a besoin. Ceci pourrait engendrer des ralentissements au niveau local, risquant de compromettre le bon déroulement de la simulation. Le serveur doit être capable à distinguer ces dégradations et décider, en conséquence, d'apporter plus de ressources au client qui "pêche !"

L'enveloppe englobante est un outil pouvant renseigner le serveur sur les ressources disponibles chez un client.

6.5.5.2 Propriétés de l'enveloppe englobante

La taille de l'enveloppe de l'objet virtuel dépend principalement du délai de communication entre les différents clients et le serveur. D'autres paramètres sont à prendre en compte tels que la nature du lien entre le serveur et le client, la nature du réseau utilisé, la position, la vitesse et la direction de l'enveloppe, figures 6.33 et 6.34. Dans ces cas de figure, l'enveloppe sert d'indicateur de nature/qualité de la communication entre le serveur et un utilisateur particulier. En d'autres termes, le système d'interaction a, à chaque instant, des informations sur le délai que pourrait mettre une commande à être traitées par le système, [14].

La taille de l'enveloppe pourra être calculée à partir de la relation empirique suivante :

$$\text{Taille de l'enveloppe} = \text{Délai} x (1 + \text{vitesse de l'objet client}) / K \tag{6.39}$$

K étant un coefficient positif, à synthétiser en fonction des paramètres physiques de la simulation. Ainsi, si le délai est nul, l'enveloppe est nulle et si la vitesse de l'objet est nulle, la taille de l'enveloppe est égale au délai total. En effet, si la vitesse est nulle, cela signifie que l'objet client est immobile et ainsi si un autre objet vient interagir avec ce dernier, l'objet client est tout de même soumis au délai de traitement de l'information. Mais, si le délai est nul alors l'enveloppe n'a plus lieu d'être puisque l'information est traitée instantanément par le client. Par conséquent, le serveur entreprend les actions suivantes, à savoir :

- Partage de Ressources entre client/serveur et entre client/client. Fusion de plusieurs objets pour en former virtuellement un seul (si contact il y a entre les trois composantes).

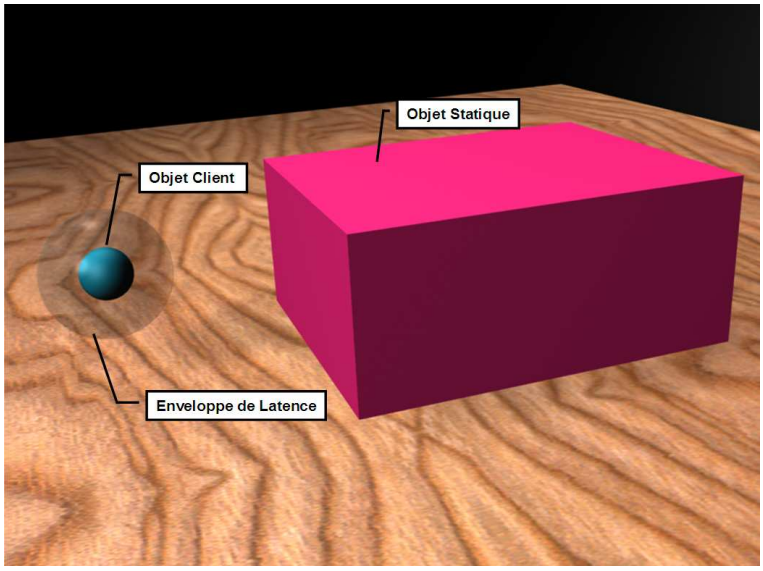

FIGURE 6.33 – *Un client et un objet statique dans une même scène virtuelle sans contact.*

- Prédiction du mouvement pour le rendu haptique basé sur la vitesse et l'accélération des objets manipulés ainsi que sur le retard de communication.
- Système de priorités, le client avec la plus grande enveloppe a besoin de plus de temps pour le traitement de l'information à cause d'une communication trop lente ou à cause de ressources peu suffisantes sur sa machine locale. Dans ce cas là, le serveur peut donner la priorité au client qui mettra le plus de temps à traiter l'information.

6.5.5.3 Description du fonctionnement avec l'enveloppe et présentation de cas typiques

Seuls les objets clients ont, par défaut, une enveloppe de tailles variables suivant les critères expliqués précédemment. Les objets statiques n'ont jamais d'enveloppe et les objets dynamiques prennent la plus grande enveloppe du client avec qui ils interagissent.

Cas de contact d'un client/objet statique

Le client est informé de la proximité de l'objet statique avant le contact. La distribution de ressources dépend de la taille de l'enveloppe. La prédiction du rendu haptique peut être effectuée. Si le client concerné ne dispose pas des ressources pour le traitement de son information, symbolisé par la taille de son enveloppe, le serveur peut éventuellement rediriger ses calculs (rendu haptique) vers un autre client ou vers le serveur lui-même.

Cas de contact d'un client/objet dynamique

Le client est informé de la proximité de l'objet dynamique avant le contact. Lorsque l'enveloppe du client entre en contact avec l'objet dynamique, ce dernier se dote d'une enveloppe de la même taille et qui englobe les deux objets pour n'en former virtuellement qu'une vis à vis du serveur ou de la machine locale dans l'espace du temps de contact. Chaque perturbation appliquée sur l'un des deux objets aura une conséquence directe sur l'autre.

La plate-forme de simulation distribuée mise en place a donné de bons résultats. Deux objets ont été contrôlés avec succès sur une plate-forme serveur à partir d'une console client. Je souhaiterais développer une interface " user friendly " sur le réseau Internet et

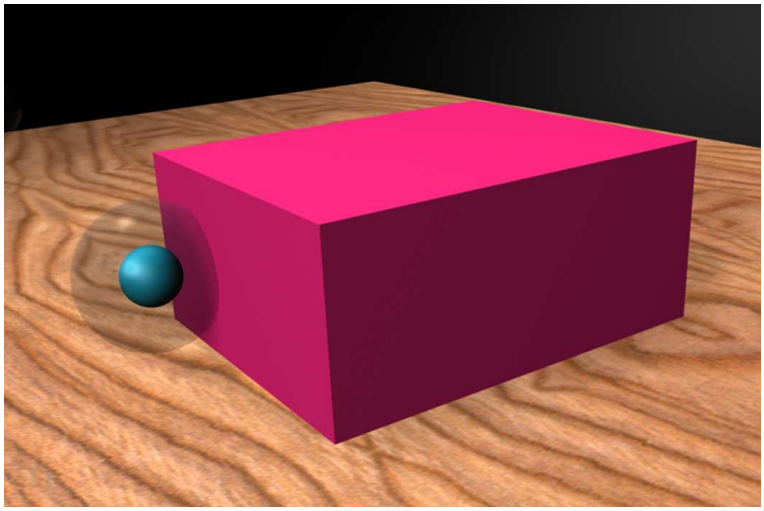

FIGURE 6.34 – *Un client et un objet statique en collision contact.*

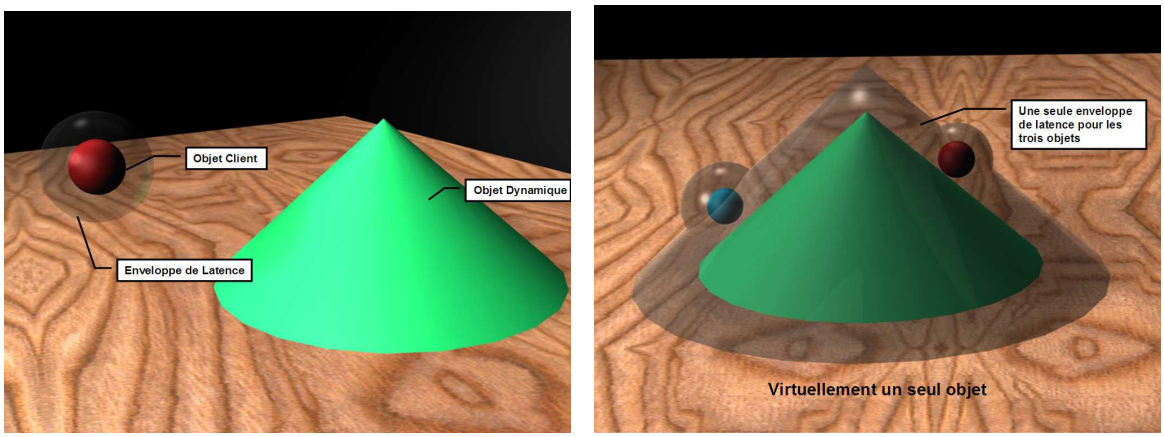

FIGURE 6.35 – *Objet dynamique, avec et sans contact.*

ainsi permettre une série de tests (i.e. un chronomètre) afin de confronter cet outils aux critiques des différents utilisateurs.

6.5.5.4 Résultats de simulations : enveloppe de latence

Des simulations ont été réalisées afin de comprendre au mieux le fonctionnement de l'enveloppe de latence ainsi que la prédiction du mouvement pour le rendu haptique. Un système a un degré de liberté semblable celui définit auparavant (section 6.3.1.4) a été modélisé dans lequel un opérateur approche son avatar près d'un mur virtuel.

Dans cette première simulation, les retards de transmission sont supposés constants mais différents, $\tau_1 = 1$ *sec* et $\tau_2 = 0.5$ *sec*. La figure 6.36 (droite) montre le suivi en position et le comportement du retour d'effort qui reste stable quand l'opérateur interpénètre le mur virtuel. L'opérateur applique un profil de force sinusoïdal F_h qui permet une " navigation " simple et une augmentation de la position de l'objet virtuel au sein de l'environnement virtuel jusqu'à ce que le contact ait lieu avec le mur virtuel. Ce contact est obtenu quand la position de l'interface virtuelle atteint 20 *cm* à partir de son point de départ.

On peut noter aussi que lorsque le contact se produit, la vitesse de l'interface haptique s'annule rapidement et la force de retour augmente de façon à établir un équilibre statique

durant le contact, mais ce phénomène se produit après un retard de retour $\tau_2 = 0.5$ *sec*. L'erreur de position qui apparaît quand le contact se produit est donc incontournable du fait de ce retard de transmission.

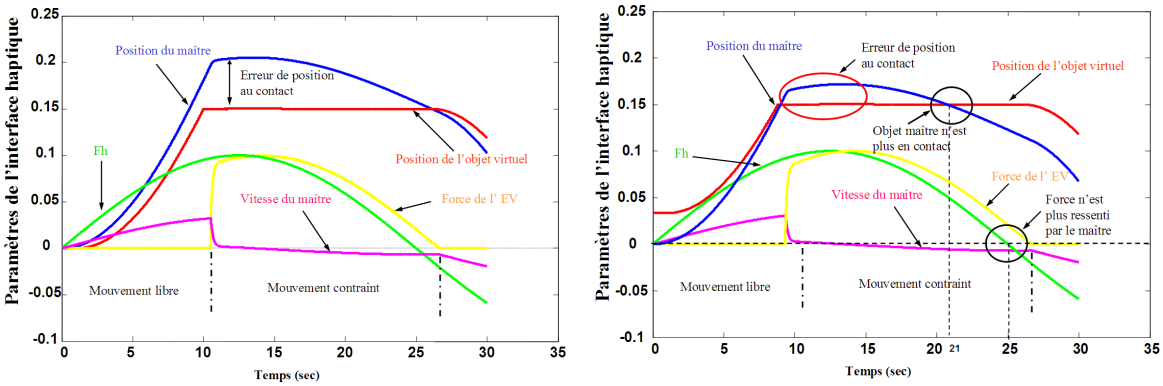

FIGURE 6.36 – *Simulation d'une interaction haptique avec retard constant sans et avec le module "enveloppe de latence", K = 30.*

La figure 6.36 (droite) présente le résultat obtenu en ajoutant le module "enveloppe de latence" avec un facteur K égal à 30.

Nous pouvons remarquer que, avec l'ajout de ce module "enveloppe de latence", l'erreur de position en contact est moindre comparée au premier cas. Elle passe de 10 *cm* à 2 *cm*, ce qui améliore nettement la cohérence visio-haptique ainsi que la fidélité du retour d'effort (instant de contact plus court). Nous remarquons aussi que, bien que la position du dispositif haptique ne soit plus en contact avec le mur virtuel, à environ 21 *sec*, l'opérateur humain ressent encore une force qui ne s'arrêtera qu'à partir de 25 *sec*.

Le résultat de la figure 6.37 est réalisé avec un gain de K=50. Quelques différences sont à relever par rapport au cas précédent (K=30), à savoir que l'erreur est plus grande au contact (4 *cm*) mais la durée de la collision "vue" par l'opérateur est plus longue (23 *sec*). En effet, plus K augmente, plus l'enveloppe rétrécit et plus nous nous rapprochons du cas sans le module de l'enveloppe de latence.

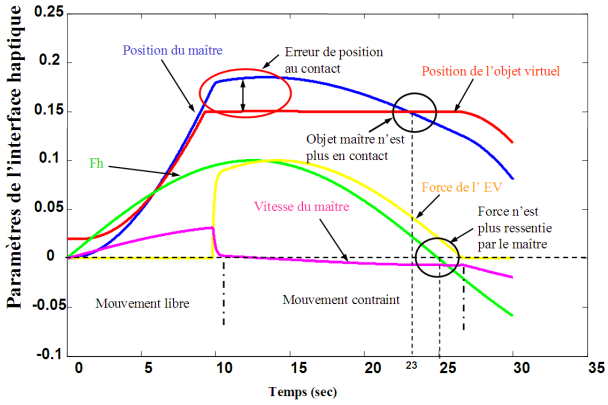

FIGURE 6.37 – *Simulation d'une interaction haptique avec retard constant avec le module "enveloppe de latence", K=50.*

Le reste des résultats est réalisé sous un temps de retard variable. Le comportement est reste stable malgré la variation du retard $\tau_1(t)$ représenté sur la figure 6.38 (gauche) par une courbe noire.

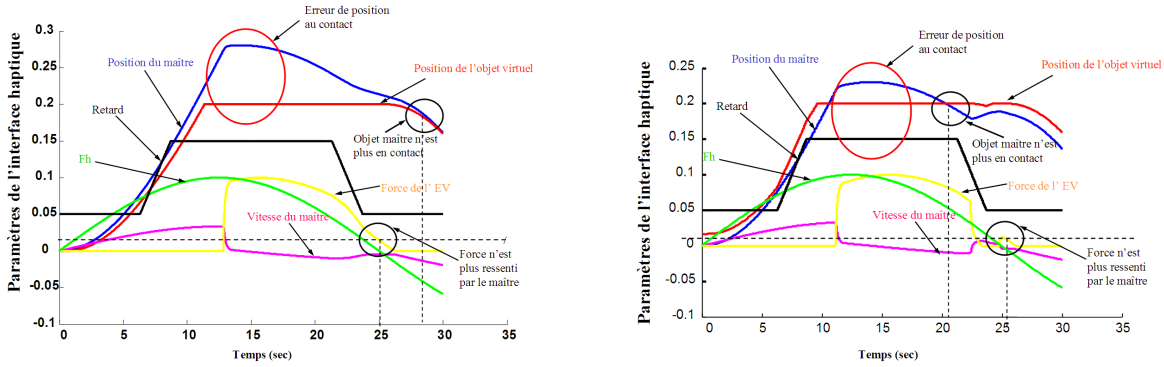

FIGURE 6.38 – *Simulation d'une interaction haptique dans le cas d'un retard variable sans et avec le module "enveloppe de latence" , K = 30*

La figure 6.38 (droite) illustre un résultat obtenu en ajoutant le module "enveloppe de latence" avec un facteur K égal à 30. Nous pouvons constater que l'erreur au contact est plus petite comparée à celle sans enveloppe. En effet, l'erreur passe de 8 cm à 2 cm.

La position du dispositif haptique doit épouser au mieux celle du mur virtuel lors d'un contact. Par conséquent, nous avons voulu minimiser l'erreur de position au contact tout en maintenant la force ressentie par l'opérateur humain et ce tout au long du contact. Pour se faire, une modification a été apportée à l'enveloppe de latence. L'idée réside dans le fait que l'enveloppe n'interpénètrera jamais le mur virtuel, mais au moment de la collision, elle rétrécit jusqu'à disparaître au moment où l'objet maître sera lui-même en contact avec le mur (cf. figure 6.38). Une fois le contact consommé, l'enveloppe grandira jusqu'à atteindre sa taille prédéfinie.

6.6 CONCLUSION

L'interfaçage haptique requiert un support matériel actif qui doit être asservi afin de restituer efficacement les paramètres haptiques. Cet asservissement se base sur des approches d'automatique. Nous avons montré que les stratégies de contrôle / commande employées dans les applications de l'interfaçage haptique en réalité virtuelle empruntent aux architectures de téléopération à couplage bilatéral. Les outils qui permettent de synthétiser des lois de commande stables et transparentes ont été présentés.

Les applications de l'haptique sont nombreuses et pour bon nombre d'entres elles, il sera nécessaire que les utilisateurs interagissent les uns avec les autres et aussi avec les objets composant la scène virtuelle. De ce fait, nous avons lancé des premiers travaux sur la mise en œuvre d'architectures informatiques et des algorithmes qui permettent de faciliter une "collaboration haptique" distribuée avec des utilisateurs distants. Nous souhaitons que les utilisateurs puissent avoir accès à cet espace de collaboration via des lignes de communication spécialisées et non spécialisées (Internet par exemple). Les délais de transmission des lignes non dédiées sont indéterministes. En conséquence, ils ne sont pas compatibles avec les contrôleurs classiquement utilisés pour faire du rendu haptique.

La collaboration haptique distribuée pose deux problèmes majeurs. Le premier a trait aux architectures informatiques, le deuxième problème concerne les retards de transmission car ils induisent des problèmes de stabilité des dispositifs haptiques. Les approches basées sur la commande bilatérale classique ont offert des solutions qui restent à améliorer. Il est certain que ces défauts peuvent être surmontés en apportant une attention

particulière aux protocoles utilisés assurant une meilleure qualité de service voir une refondation des infrastructures (fibre optique) afin d'améliorer les bandes passantes disponibles (en espérant que les flux qui transitent ne décuplent pas).

Modélisation dynamique des véhicules à deux roues : Contributions et Applications

7

Sommaire

7.1 Introduction . . . 113
7.2 Mouvement de translation et de rotation . . . 114
7.3 Forces et moments . . . 115
7.3.1 L'interface roue-sol . . . 115
7.3.2 Forces aérodynamiques . . . 121
7.4 Dynamique des véhicules deux-roues . . . 121
7.4.1 Historique de la modélisation des deux roues . . . 121
7.4.2 Modèle dynamique de Sharp (71) . . . 125
7.4.3 Analyse de la dynamique d'un deux-roues . . . 130
7.4.4 Modifications apportées au modèle de Sharp 71 . . . 133
7.5 Développement de modèle dynamique pour les applications temps-réel : Technique de Newton-Euler récursive . . . 134
7.5.1 Géométrie du véhicule deux roues . . . 134
7.5.2 Dynamique des véhicules deux roues . . . 135
7.5.3 Résultats de simulations . . . 137
7.5.4 Discussion . . . 141
7.6 Sécurité préventive pour les conducteurs des véhicules deux roues . . . 141
7.6.1 Synthèse de travaux de recherches sur les deux roues motorisés . . . 142
7.6.2 Architecture du système d'alertes pour les véhicules deux roues . . . 144
7.6.3 Analyse de la perte de contrôle d'un véhicule deux roues lors de la prise de virage . . . 145
7.7 Conclusion . . . 157

La conduite d'un véhicule de deux roues est une tâche assez délicate et loin d'être intuitive comparée à celle de la conduite d'une voiture. Les spécificités de la conduite moto résident, entre autres, dans les accélérations rendues par les motocycles, les aspects de stabilité/équilibre du véhicule, les effets centrifuges et aérodynamiques, le rapport massique

entre le conducteur/moto, etc. Ces points font de la conduite d'un deux roues une opération difficile demandant au "motard" une grande présence et concentration surtout que l'environnement assez "rude" est plutôt approprié aux véhicules 04 roues. Par conséquent, les conducteurs des deux roues sont considérés parmi les usagers les plus vulnérables de la route, en témoigne le nombre d'accidents croissant chaque année.

Plusieurs outils ont été mis en place afin de réduire le nombre d'accidents provoqués par les utilisateurs des deux roues, nous citons :

- Les formations de ces usagers par le biais de stage afin d'obtenir un permis spécifique,
- La formation sur des plates-formes à restitution de mouvements "simulateurs de conduite" (objet de notre prochain chapitre),
- Les systèmes de prévention passive ou active (ESP, ABS, ceinture de sécurité, etc.),
- Les systèmes d'alertes nécessaires pour renseigner le conducteur sur des situations de risques (objet de la fin de ce chapitre).

Le présent chapitre aborde les aspects cinématique et dynamique des véhicules deux-roues afin de comprendre leurs comportements et ainsi définir des indices pertinents aidant, d'une part, à la synthèse d'un système d'alertes au conducteur face à des situations de danger, et d'autre part, au choix de l'architecture mécanique du simulateur moto dédié à la formation (sélection de mouvements pertinents pour le rendu).

7.1 Introduction

L'élaboration d'un modèle dynamique rigoureux pour les deux roues reste une tâche complexe. Les différents travaux liés à ce sujet présentent des modèles simplifiés dépendant fortement de la problématique traitée. En effet, l'analyse de la maniabilité ou du contrôle du mouvement des deux roues autour des trajectoires en quasi-équilibre, telles que le mouvement en ligne droite ou en virage, est en général basée sur un modèle linéaire qui découle de la théorie des petites perturbations [28, 127, 29]. Ce type de modèle ne fournit qu'une idée locale sur la dynamique des deux roues, et il ne peut pas être utilisé comme un générateur de consignes dans la problématique de la simulation de conduite. La littérature propose également des modèles non linéaires pour décrire au mieux la dynamique des deux roues. Mais, dans ce cas également, certaines hypothèses simplificatrices ont été formulées pour rendre l'obtention de ce modèle plus aisée, telles que, par exemple, le découplage entre la dynamique longitudinale et la dynamique latérale.

De manière générale, un véhicule routier constitue un système complexe et rapide. Il est composé d'un certain nombre de sous-systèmes ayant des caractéristiques particulières :

- La présence d'organes de liaison (suspension, direction, etc.) qui génèrent des couplages entre plusieurs mouvements,
- L'environnement de conduite est source de perturbations externes de nature aléatoire,
- Le contact roues-sol est complexe et certaines grandeurs de ce contact sont difficilement quantifiables,
- L'interaction homme-véhicule est susceptible d'affecter les propriétés intrinsèques du système et de changer son comportement dynamique.

Ces dernières contraintes sont généralement contournées par diverses simplifications (linéarisation, etc.).

Par ailleurs, la modélisation dynamique peut se faire de deux manières : soit par une approche analytique, soit par une approche numérique. Dans le deuxième cas de figure, il existe de nombreux outils (ADAMS [1], DADS [2], Dymola [3], simMechanics de Matlab [4] ou DynaFlexPro [5]), tous dotés d'une interface graphique. L'approche alternative est le développement symbolique des équations du mouvement. Elle est très onéreuse en terme de temps et de vérification. Elle offre en revanche l'avantage d'une plus grande flexibilité dans la description et la caractérisation du système. Dans ce cas, l'utilisation d'une bibliothèque mathématique est très conseillée. Ces bibliothèques consistent en des com-

1. ADvAnced Multi-body Simulation de la société MSC Software : http ://www.mscsoftware.com
2. LMS DADS : http ://www.lmsintl.com/DADS
3. Dynamic Modeling Laboratory de la société Dynasim, une filiale de Dassault Systèmes, environnement basé sur Modelica, un langage de modélisation open source : http ://www.dynasim.se/index.htm
4. www.mathworks.fr
5. Package de logiciel de calcul symbolique Maple : http ://www.maplesoft.com/products/thirdparty/dynaflexpro/

posants dédiés (comme Autolev [6], SD/Fast [7], Neweul [8], AutoSim [9], TsiProPac [10]), implémentés dans des progiciels de calcul algébriques tels que Mathematica ou Maple.

Par la suite, et avant d'aborder les détails des équations dynamiques du mouvement, je commencerai par une description préliminaire des aspects généraux de la modélisation dynamique. Dans un premier temps, la terminologie associée aux divers degrés de liberté sera établie. Les efforts au point de contact du pneu avec la chaussée et les effets aérodynamiques seront décrits.

7.2 Mouvement de translation et de rotation

Un véhicule terrestre se déplace suivant les six degrés de liberté (DDL) constitués par un ensemble de trois translations et de trois rotations (Figure 7.1). La translation sur l'axe **X** dénote le déplacement longitudinal, le long de l'axe **Y** est le déplacement latéral et la translation verticale se fait suivant l'axe **Z** qui traduit le débattement du châssis via sa suspension. La rotation autour de l'axe **Z** représente le mouvement de lacet ψ du véhicule qui détermine sa trajectoire, une deuxième rotation dite de roulis φ autour de l'axe **X** définit l'inclinaison de la caisse lors d'une prise de virage ou un changement de voie. Enfin, la rotation θ autour de l'axe **Y** décrit le tangage du véhicule rencontré lors des phases d'accélération et de freinage.

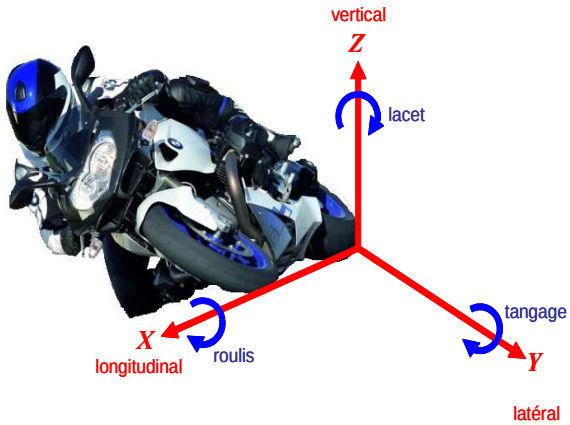

Figure 7.1 – *6 DDL d'un véhicule deux-roues*

6. de OnLine Dynamics Inc : http ://www.autolev.com/
7. Développé par Michael Sherman et Dan Rosenthal de Symbolic Dynamics et distribué par PTC depuis 2001 : http ://www.sdfast.com/
8. Développé en 1979 à l'Institut für Technische und Numerische Mechanik à l'université de Stuttgart
9. Noyau de simulation multi-corps développé au Département de Mécanique au Collège Impérial à Londres. Les droits d'utilisation sont rachetés par Mechanical Simulation Corporation : http ://www.carsim.com
10. Développé et supporté par Techno-Sciences Inc. C'est une toolbox symbolique pour la modélisation mécanique qui fonctionne sous Mathematica : http ://www.technosci.com

7.3 Forces et moments

Au cours de son mouvement, tous les efforts extérieurs agissant sur le véhicule, exceptés ceux de l'aérodynamique, sont générés suite au contact pneu-chaussée. Dans un premier temps, on identifie la force latérale du guidage, la force longitudinale de traction qui accélère et freine le véhicule et les moments correspondants. Bien que ces forces soient dynamiquement liées, elles sont généralement traitées séparément. Le système des actions aérodynamiques est constitué de la force de traînée longitudinale, de poussée latérale et de portance verticale, généralement appliquées au centre de pression. Au-delà de ces efforts, d'origine externe, d'autres, de nature intrinsèque, se développent et découlent surtout de diverses liaisons et contraintes mécaniques du véhicule à savoir, la suspension, le système antiroulis, la direction, etc.

7.3.1 L'interface roue-sol

Le pneumatique constitue l'une des composantes importantes dans la dynamique des véhicules terrestres. Sa caractéristique fondamentale d'élasticité et de déformabilité permet d'assurer l'adhérence et le contact permanent du pneu sur le sol. De plus, une fois monté sur la jante, il permet de supporter la charge verticale et d'amortir les chocs ce qui offre un apport fondamental dans le confort de la conduite [128]. Par conséquent, la connaissance et la compréhension des modes de fonctionnement des pneumatiques, et la modélisation des efforts développés à l'interface pneu-chaussée sont essentielles pour toute étude approfondie de la dynamique d'un véhicule terrestre.

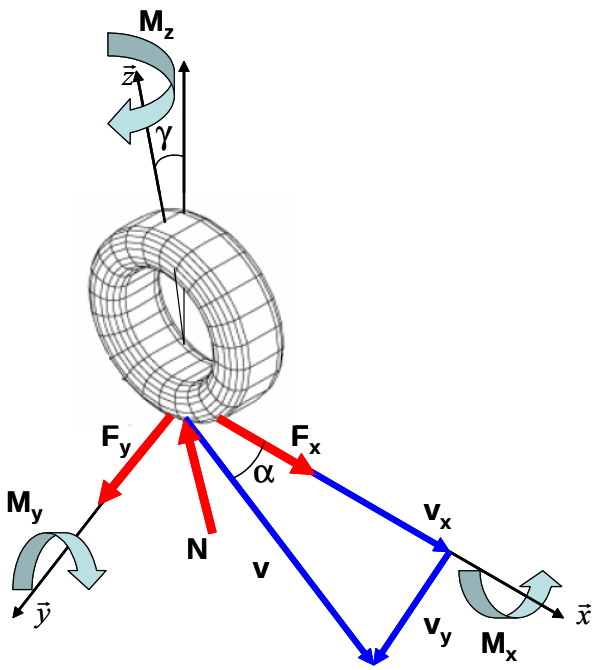

Figure 7.2 – *Représentation des forces et moments appliqués au pneu par la chaussée*

La synthèse de ces forces et moments (Figure 7.2) est fondée sur une représentation mathématique, dont les différents paramètres possèdent une signification physique appropriée. Un bon modèle est celui qui permet d'offrir une présentation capable de décrire le

plus fidèlement possible le comportement statique aussi bien que dynamique du pneumatique, et de s'adapter à des conditions de fonctionnement autres que celles pour lesquelles les paramètres ont été estimés.

Dans la littérature, nous trouvons trois approches principales du modèle de pneumatique, [129, 130, 131]. La première, dite mécanique [132], est basée sur l'assimilation de chaque partie élémentaire de la surface de contact au sol par un système ressort-amortisseur d'une complexité élevée. La deuxième approche, dite de brosse [133], est fondée sur le même principe où chaque partie élémentaire est modélisée par un poil de brosse possédant une raideur, permettant ainsi une description plus fine du phénomène de déformation (cisaillement). Enfin, la dernière représentation, de nature empirique, possède la caractéristique de pouvoir reproduire les mesures expérimentales avec une grande précision [131].

7.3.1.1 Force longitudinale

La présence d'une force de traction ou de freinage génère un cisaillement à travers la surface de contact (appelée aussi patch de contact ou bande de roulement). Dans ce cas, la vitesse longitudinale du point de contact est différente de la vitesse tangentielle du pneu, créant un glissement longitudinal décrit par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \kappa = -\frac{v_x - \omega R}{\omega R} \text{ en accélération} \\ \kappa = -\frac{v_x - \omega R}{v_x} \text{ en freinage} \end{cases} \tag{7.1}$$

Où R est la distance entre le point de contact et le centre de rotation de la roue et ω est la vitesse de rotation de la roue. La force longitudinale est donnée sous une forme linéaire par l'équation :

$$F_x = K_x(N) sat\left(\frac{\kappa}{\kappa_{max}}\right) \tag{7.2}$$

Où $K_x(N)$ est le coefficient de raideur des pneumatiques en fonction de la charge verticale N. κ_{max} est le glissement longitudinal maximum et sat est la fonction de saturation.

7.3.1.2 Force latérale

La force latérale est nécessaire au guidage du véhicule, elle permet de générer l'accélération latérale en virage et de résister aux perturbations extérieures telles que les rafales de vents transversaux.

Lorsqu'une roue est soumise à une sollicitation latérale (exemple d'un braquage) dans un sens donné, la surface de contact du pneumatique sur la chaussée tend à glisser dans le sens opposé. La déformation résultante de ce glissement crée un angle entre l'axe longitudinal de la roue et la direction de son mouvement, cet angle est communément appelé "angle du glissement latéral" ou "angle de dérive". En réaction à la déformation, le pneumatique produit un effort latéral, F_y, comme il est illustré sur la figure 7.3.

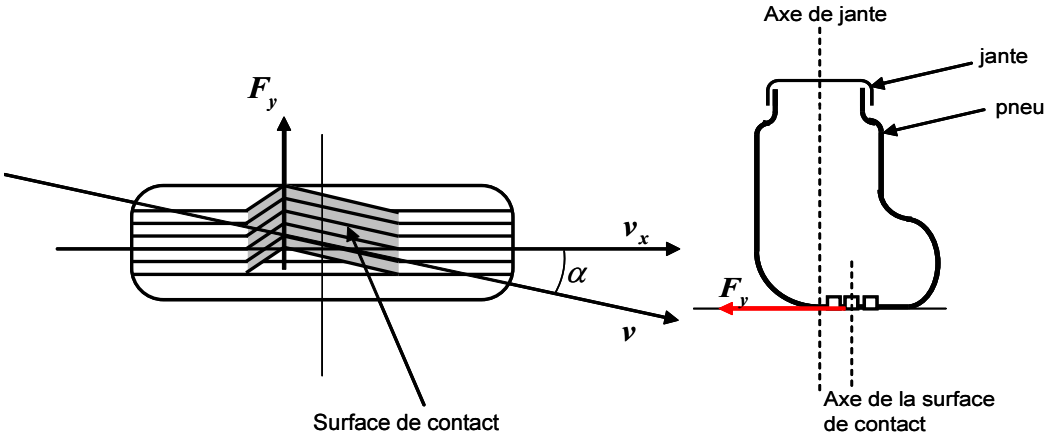

FIGURE 7.3 – *Force du glissement latéral : (à gauche) cisaillement de la surface de contact, (à droite) ballant du pneumatique*

Mathématiquement, le glissement latéral est mesuré comme étant l'angle entre la projection du vecteur de déplacement **v** et l'intersection du plan de la roue avec le plan de la chaussée (axe $\vec{x}$), exprimé par l'expression suivante :

$$\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_x} \tag{7.3}$$

Par ailleurs, et de part de sa conception, la roue n'est pas tout à fait perpendiculaire à la surface de la chaussée, elle est inclinée, par rapport au plan vertical, d'un angle γ appelé angle de carrossage (Figure 7.2), contribuant dans la génération de la force de glissement latéral. Généralement, la force de glissement peut être exprimée par une relation linéaire suivante [134] :

$$F_y = K_\alpha \alpha + K_\gamma \gamma \tag{7.4}$$

Où K_α, est la rigidité de dérive. Plus elle est élevée, plus le pneumatique répond mieux aux sollicitations latérales importantes. K_γ est la rigidité du carrossage.

Cependant, tout effort latéral supporté par le pneumatique provoque un déplacement de la surface de contact roue-sol par rapport au plan de la jante, ce déplacement est appelé "ballant du pneumatique" (Figure 7.3). Toutefois, dans la documentation spécialisée, la notion de longueur de relaxation σ est préférée [135]. Cette longueur représente la distance durant laquelle le pneumatique doit rouler pour voir disparaître le ballant et pouvoir se mettre en appui afin de générer une force latérale. Ce comportement transitoire est modélisé par un filtre de premier ordre appliqué à l'angle de glissement latéral, comme suit :

$$\frac{\sigma}{v_x}\dot{\alpha} + \alpha = \alpha_0 \tag{7.5}$$

Où, α est l'angle de glissement instantané, α_0 est celui calculé en régime quasi-statique par l'équation (7.4).

7.3.1.3 Moment de renversement

Ce moment, de nature déstabilisante, est causé par le carrossage de la roue [136]. On peut constater que ce phénomène est plus important pour un véhicule deux-roues que

pour une voiture. En effet, l'angle de carrossage pour une moto est directement lié au mouvement du roulis qui peut atteindre les 55° dans certains cas extrêmes.

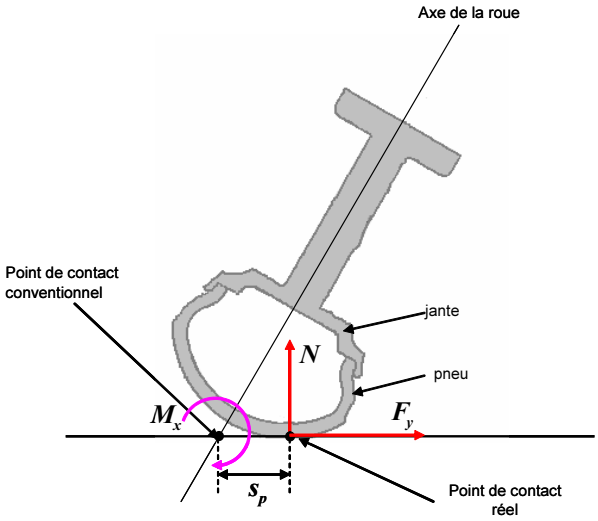

FIGURE 7.4 – *Moment de renversement*

D'un autre côté, deux définitions différentes du point de contact pneu-chaussée coexistent. Dans la première, ce point, dit conventionnel, est défini comme l'intersection du plan vertical de la roue avec le sol. Cependant, vue la géométrie torique du pneumatique, le point de contact pneu-sol se déplace transversalement le long de la circonférence du pneu [137] et se retrouve à une distance S_p du point conventionnel (Figure 7.4). Donc, si l'ensemble des efforts pneumatiques est calculé autour du point de contact conventionnel, le moment de renversement peut être rapproché par un simple produit entre la charge verticale et le bras de levier associé [138], autrement, il ne sera par considéré (bras de levier nul au point de contact réel). Pour le premier cas, le couple de renversement vaut :

$$M_x = -S_p N \tag{7.6}$$

7.3.1.4 Moment de résistance au roulement

Le diamètre de la roue à l'arrêt est différent de celui de la roue en roulement. Cette différence créée un patch de contact qui, une fois soumis à la charge verticale, génère un moment de résistance au roulement. Ce moment est fonction du paramètre de frottement et de la charge verticale :

$$M_y = f_w.N.R \tag{7.7}$$

Où f_w est le coefficient de frottement et R est le diamètre de la roue en roulement. Pour les motos, une formule empirique [139] avait été proposée permettant de calculer le coefficient de frottement, telle que :

$$f_w = \begin{cases} 0.0085 + \frac{0.018}{p} + \frac{1.59.10^{-6}}{p} V^2 & si \quad V < 165km/h \\ \frac{0.018}{p} + \frac{2.91.10^{-6}}{p} V^2 & si \quad V > 165km/h \end{cases} \tag{7.8}$$

Où p est la pression du pneu.

7.3.1.5 Moment d'auto-alignement

Pendant la phase de déformation latérale, ce qui donne naissance aux efforts transversaux, la distribution d'effort sur la surface cisaillée n'est pas symétrique. En effet, la surface de contact se déplace aussi parallèlement à l'axe longitudinal de la roue [140] selon une direction opposée au mouvement (Figure 7.5). Par conséquent, le point de contact de la force latérale se retrouve à une distance t du centre de patch, dite chasse pneumatique. Par conséquent, un moment correspondant est développé, qui tend à ramener la roue dans son plan longitudinal, d'où son appellation "moment d'auto-alignement".

Les résultats expérimentaux ont montré que la chasse pneumatique est maximale lorsque le glissement latéral est nul. Cette chasse peut être formulée par l'expression suivante [141] :

$$t = t_{max}\left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{max}}\right) \tag{7.9}$$

où t_{max} est la chasse maximale.

Enfin, une représentation linéaire peut être adoptée pour le calcul du moment d'auto-alignement [138], comme suit :

$$M_z = -tF_y + M_i\gamma \tag{7.10}$$

où M_i est le coefficient de raideur radiale du pneumatique et γ est l'angle de carrossage de la roue considérée.

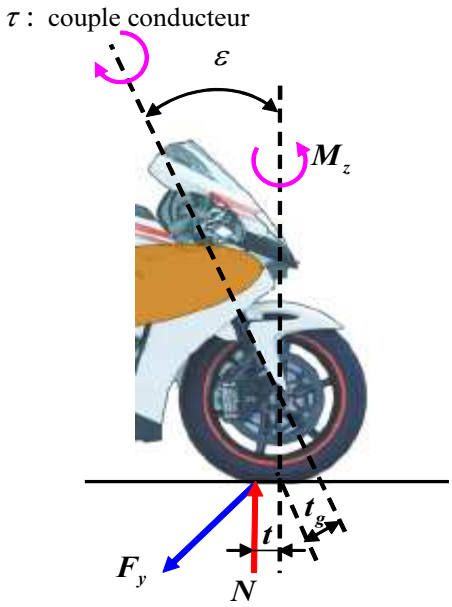

FIGURE 7.5 – *Moment d'auto-alignement : t_g est la chasse géométrique et t est la chasse pneumatique*

7.3.1.6 Formule magique de Pacejka

Tout pneumatique présente une limite au-delà de laquelle il ne peut supporter une force latérale supplémentaire. Lorsqu'un pneu atteint cette saturation, il glisse latéralement et le véhicule devient incontrôlable.

Le modèle présenté par Pacejka en 1987 permet de reproduire ce comportement non linéaire pour les forces et moments pneumatique, jusqu'ici, modélisés par des formulations linéaires [130]. Il suit une approche empirique dont les paramètres sont déterminés par des mesures physiques. Une seule expression est à utiliser pour la force longitudinale et latérale ainsi que le moment d'auto-alignement, donnée par :

$$\begin{cases} y(x) = D.\sin\{C.\arctan[B.x - E(B.x - \arctan(B.x))]\} \\ Y(x) = y(x) + S_V \\ x = X + S_H \end{cases} \tag{7.11}$$

Où B, C, D et E sont des coefficients représentant les propriétés géométriques de la courbe 7.6. S_H et S_V déviations horizontale et verticale, Y la variable de sortie qui correspond à la force ou au moment à calculer et X la variable d'entrée qui correspond au glissement latéral λ, au glissement longitudinal κ ou à l'angle de carrossage φ. A partir de la figure 7.6, il est évident que la quantité $\tan^{-1}(BCD)$ correspond à la pente de la courbe, donc à la valeur de la raideur prise dans les équations linéaires citées auparavant.

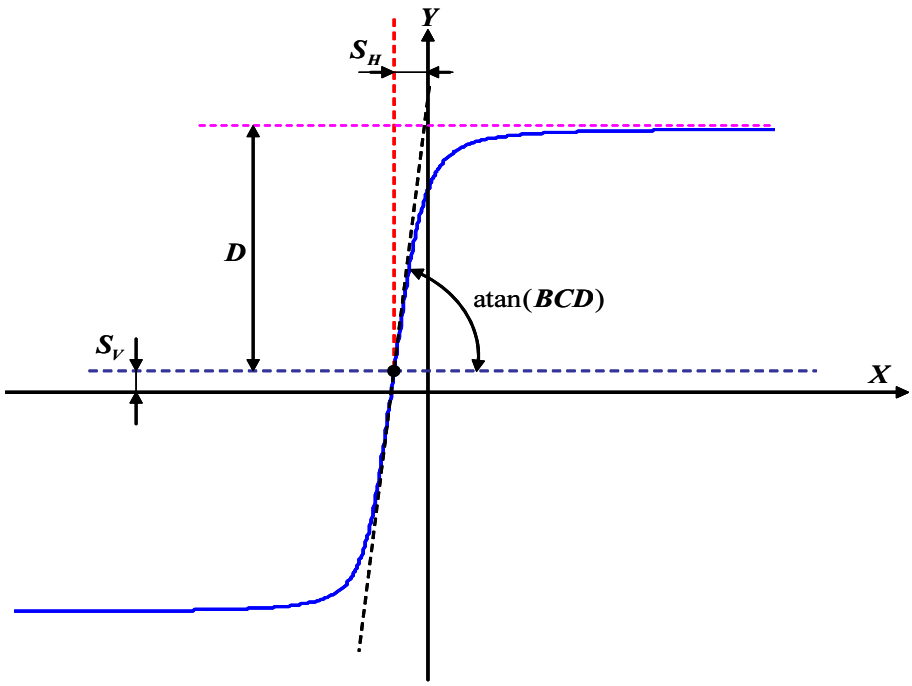

FIGURE 7.6 – *Tracé de la formule magique de Pacejka*

Dans sa version originale, cette formule était destinée aux véhicules automobiles et aux poids lourds, c'est-à-dire, pour des pneumatiques avec de larges glissements latéraux et de faibles angles de carrossage ne dépassant pas les 10° [142]. Elle fut appliquée pour les véhicules deux-roues, dont le carrossage est beaucoup plus conséquent, en premier lieu par de Vries en 1997 [143]. Ensuite, elle a été adaptée dans de nombreux travaux pour résoudre diverses problématiques [144], comme l'intégration de l'effet gyroscopique propre au pneumatique [141, 145], le problème de relaxation du pneumatique [146] et la prise en compte de l'élasticité des pneus [138].

7.3.2 Forces aérodynamiques

Comme tout objet se déplaçant dans l'air, un véhicule est exposé à un ensemble d'efforts aérodynamiques dont le torseur, calculé au centre de pression du véhicule se résume à la traînée longitudinale qui affecte principalement les performances en accélération, la poussée latérale constituant une perturbation externe influant surtout la stabilité du guidage et la portance verticale. En général, l'effort aérodynamique, dans une direction spécifique, peut être approché par une équation linéaire simple exprimée par :

$$F_D = \frac{1}{2}\rho_a C_d A V_r^2 \tag{7.12}$$

où ρ_a est la densité de l'air, $\rho_a = 1.167\ kg/m^3$ sous une température de 20° et une pression atmosphérique de 987 $mbar$. A est la surface de référence obtenue par projection frontale du véhicule. C_d est le coefficient de pénétration dans l'air et $\vec{V}_r = \vec{V}_v + \vec{V}_a$ est la vitesse relative du véhicule définie comme la somme vectorielle de la vitesse du véhicule et de celle du vent.

7.4 Dynamique des véhicules deux-roues

Cette partie est consacrée à l'étude de la dynamique des véhicules deux-roues, en se basant principalement sur les travaux de R. Sharp qui constituent une référence dans ce domaine, et plus particulièrement sur le modèle Sharp 71, qui sera considéré pour notre étude. La chronologie de la modélisation des deux-roues et leurs applications peut être approfondie dans [147].

7.4.1 Historique de la modélisation des deux roues

La littérature de la dynamique des véhicules deux-roues est aussi riche et même plus ancienne que celle de l'automobile. En effet, la première étude portant sur la stabilité et l'équilibre du véhicule bicyclette, réalisée par Whipple, remonte à 1899 [148]. Cette bicyclette est représentée par deux corps liés via l'axe de rotation du guidon. Les roues sont modélisées comme des disques circulaires où l'effet gyroscopique est pris en compte. Après Whipple, d'autres travaux traitant toujours du problème de la stabilité ont été entrepris, nous citons en particulier Bower en 1915 [149], Pearsall en 1922 [150] et Kondo en 1963 [151]. Dans toutes ces études, l'interaction pneu-chaussée a été ignorée.

En 1973, Eaton et Segel ont modifié les équations de dynamique proposées par Sharp 71, pour intégrer le couple d'auto-alignement et le couple de renversement [152]. Les résultats obtenus théoriquement sont comparés à des données expérimentales issues d'une moto instrumentée. Néanmoins, des disconcordances ont été relevées entre les résultats analytiques et physiques, attribuées à l'incohérence des équations du pneumatique dans certains points de fonctionnement. Segel et Wilson ont conclu, en 1975, qu'un modèle du pneu plus réaliste devait être développé [153].

Les modèles dynamiques cités auparavant ont été établis en quasi-statique (la vitesse longitudinale était supposée comme constante), les différents corps constituants le véhicule deux-roues sont considérés comme rigides et les mouvements de suspensions ont été ignorés. Il était intéressant donc d'examiner comment ces paramètres influençaient les caractéristiques fréquentielles des différents modes de stabilité. Ces aspects d'étude ont

été investis dans la suite des travaux de Sharp à partir de 1974 [154, 155, 156], appuyés plus tard par Goel en 1983 [157].

En 1978, Weir tentait de valider ces indices [158]. Leurs effets ont été évalués subjectivement via des expérimentations et objectivement par un modèle analytique. Ainsi, Weir a présenté la première approche de stabilisation de la moto, en incluant l'opérateur humain dans la boucle de simulation.

En 1994, Sharp publie un article qui constitue une suite de ses précédents travaux [127]. Cette fois-ci, la moto est représentée par un ensemble de 4 corps rigides (Figure 7.7) :

- le corps avant constitué du guidon, de la fourche et de la roue avant,
- le corps principal incluant le moteur, la partie inférieure du conducteur et le réservoir,
- le corps arrière contient l'assemblage de la roue arrière,
- la partie supérieure mobile du conducteur.

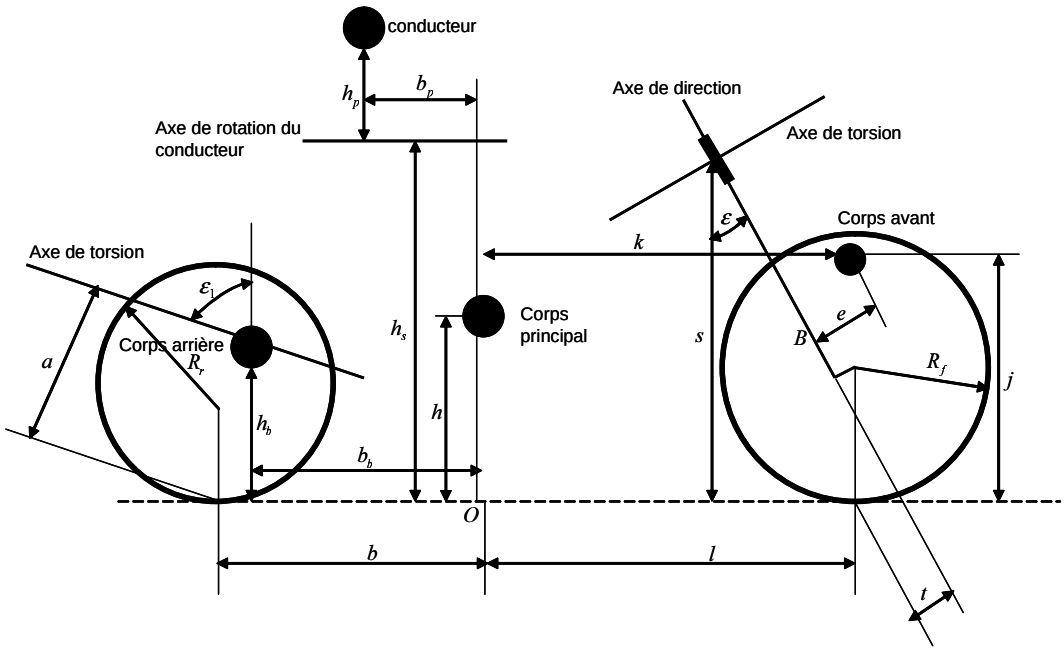

FIGURE 7.7 – *Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp94*

Ce modèle permet de simuler 8 DDL : le mouvement latéral, lacet, roulis, le système de direction, le mouvement de roulis de la partie supérieure du conducteur et les 3 torsions représentant les différentes flexibilités. Un modèle linéaire de pneumatique, dont les divers paramètres sont estimés par des interpolations des données expérimentales, est implémenté pour décrire la force de glissement latéral, le moment d'auto-alignement et le moment de renversement. Enfin, l'effort aérodynamique, constitué de deux forces et un moment, est intégré dans le développement des équations du mouvement.

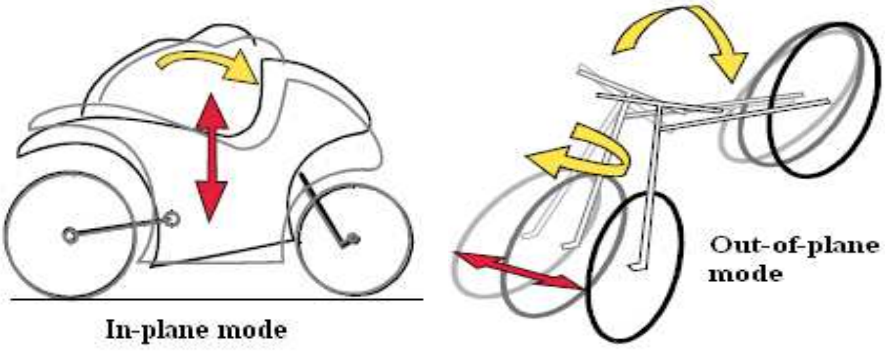

FIGURE 7.8 – *Modes "In-plane" et "Out-of-plane"*

Dans le même esprit, Sharp et al. 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 [129]. 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. Dans ce cas de figure, le couplage des deux mouvements latéral et vertical et l'interaction des modes "*in-plane*" et "*out-of-plane*" (Figure 7.8) est plus riche. Cet aspect de dynamique a été déjà commenté dans plusieurs publications [159, 129, 160, 161, 162], mais la faisabilité du calcul symbolique a montré sa limite pour ce type d'étude. La figure 7.9 schématise la géométrie de la moto correspondant à la configuration nominale en 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. Les auteurs ont engagés une campagne de mesures pour obtenir les paramètres pertinents d'une *Suzuki GSX-R1000K1*. Du fait de sa capacité à reproduire des comportements réels de motos en situation de conduite, ce modèle est repris par la société Mechanical Simulation Corporation, créateur de CarSim, pour intégrer un add-on appelé BikeSim destiné à la simulation des véhicules deux-roues.

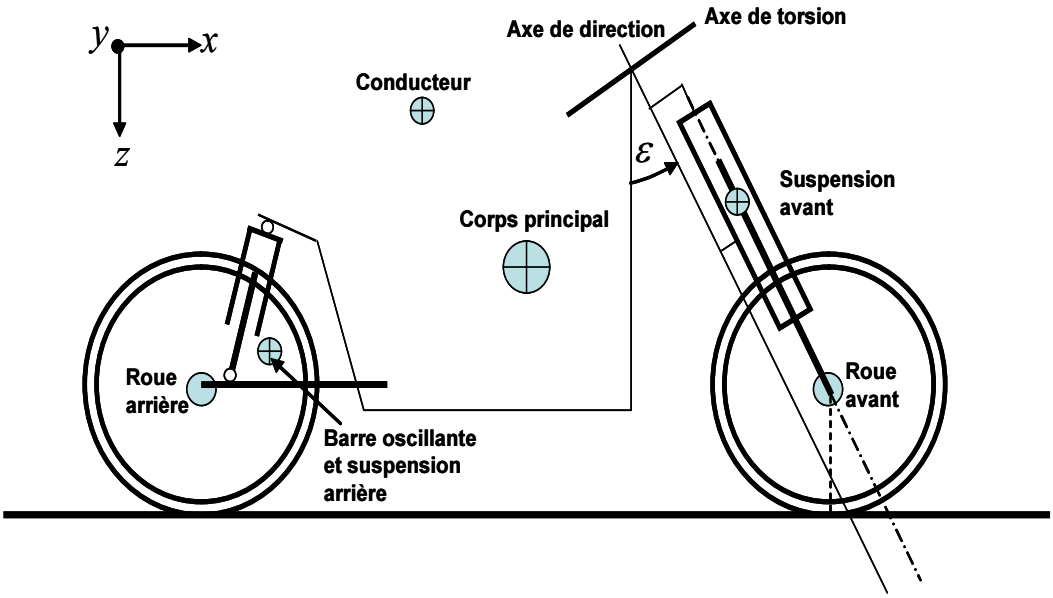

FIGURE 7.9 – *Géométrie du véhicule deux-roues adoptée pour le modèle Sharp 2001*

Plus récemment, l'équipe de Cossalter de l'université de Padoue s'est investie dans le développement et la validation expérimentale de modèles dynamiques destinés à des motos de compétition. Le projet FastBike a présenté un modèle non linéaire du véhicule deux-roues décrit comme un ensemble de 6 corps. Il permet la simulation de 11 DDL schématisés sur la figure 7.10 associés aux 3 coordonnées (1,2,3) du centre de masse de corps principal, (4) lacet, (5) roulis, (6) tangage, (7) direction, (8) et (9) débattement des deux suspensions avant et arrière, (10) et (11) rotations des deux roues [163]. Chaque corps est repéré par ses coordonnées cartésiennes, puis l'assemblage se fait par des équations algébriques représentant les contraintes géométriques. Les efforts extérieurs pris en compte sont ceux dus à la raideur et à l'amortissement des deux suspensions, aux forces et moments agissant sur le pneumatique, aux efforts aérodynamiques, au couple de direction, aux actions des freins avant et arrière ainsi qu'au couple de propulsion, qui est transmis du pignon vers la roue arrière par le biais d'une chaîne.

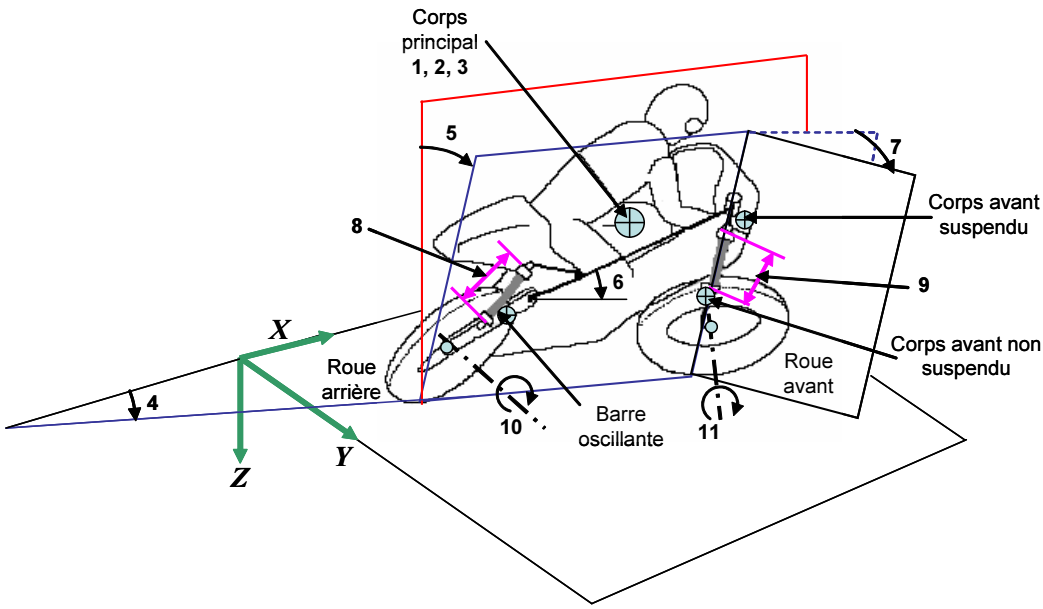

FIGURE 7.10 – *Degrés de liberté du modèle FastBike*

Afin de valider le modèle, certains tests expérimentaux ont été menés sur une Aprilia RSV 1000. Les caractéristiques géométriques et inertielles de la moto, les propriétés d'élasticité, d'amortissement et du pneumatique ont été mesurées [164]. La moto est dotée d'un système de capteurs qui permet de mesurer la vitesse du roulis, du lacet, de l'angle de direction, de la vitesse de rotation des roues et du couple de direction. Le post-traitement des données a permis de calculer la vitesse longitudinale ainsi que l'angle de roulis.

7.4.2 Modèle dynamique de Sharp (71)

En 1971, une étude brillante a été menée par Sharp [28]. Il a examiné la stabilité de la moto ainsi que sa sensibilité aux variations des paramètres géométriques et pneumatiques. Son modèle détaillé possède 4DDL dont le mouvement latéral, le lacet, le roulis et la direction. La moto est représentée comme étant un ensemble de deux solides rigides liés par le mécanisme de direction (axe du guidon). Le premier corps G_f est le solide avant (front frame), composé de la roue avant, de la fourche et du guidon. Le deuxième corps G_r est le solide arrière (rear frame), composé de la roue arrière, du moteur, du réservoir, du siège et du système d'amortissement arrière (Figure 7.11). Le motard est considéré comme rigidement lié à la moto et son mouvement n'est pas pris en compte. Certaines suppositions ont été formulées pour simplifier les développements des équations du mouvement, parmi elles :

- Les roues sont modélisées par des disques fins et 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 irrégularité,
- Le glissement longitudinal est négligé, donc la rotation des roues représente 2 DLL non indépendants,
- La vitesse longitudinale est constante, par conséquent, l'équation du déplacement longitudinal est absente du modèle,
- Seules les petites perturbations en mouvement linéaire sont considérées.

L'ensemble des efforts intégrés aux modèles se résument aux forces pneumatiques générées par le glissement latéral et l'angle de carrossage (les couples d'auto-alignement et de renversement ne sont pas introduits). Les forces aérodynamiques sont supposées suffisamment faibles par rapport à celles générées par le contact pneu-chaussée. Par conséquent, le transfert de charge entre les deux roues, particulièrement affecté par la force de traînée longitudinale, n'est pas pris en compte.

Dans la suite, nous présenterons l'essentiel de ce modèle dynamique, en commençant par définir les repères associés aux mouvements, puis les principales variables cinématiques et enfin les équations du mouvement seront explicitées dans l'annexe A.

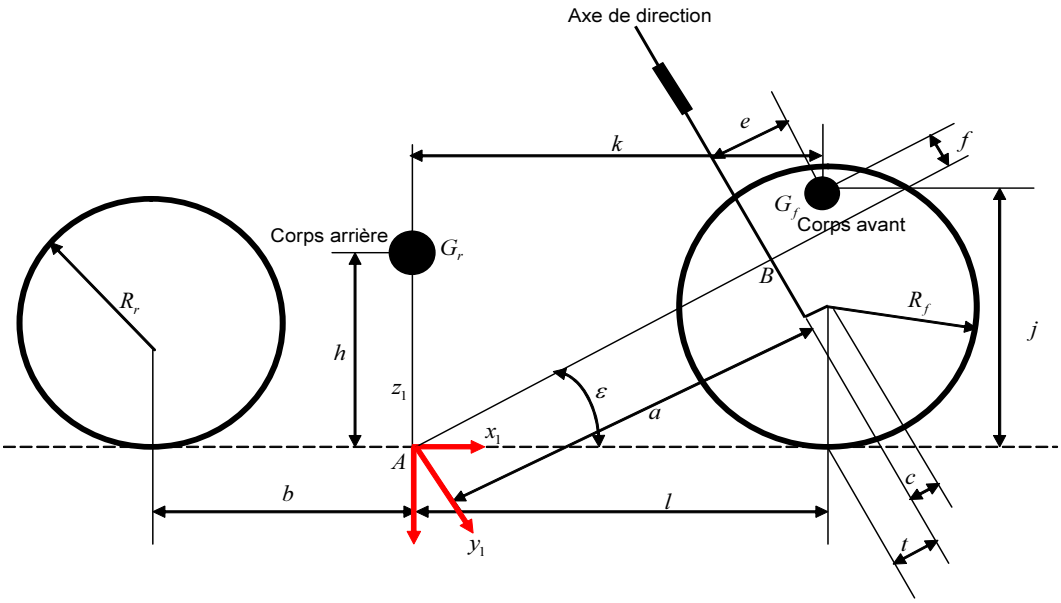

FIGURE 7.11 – *Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp 71*

7.4.2.1 Repères

Comme dans le cas de la modélisation des véhicules automobiles, on commence par introduire le repère fixe $\Re_a(O_a, \mathbf{x_a}, \mathbf{y_a}, \mathbf{z_a})$ et un repère véhicule $\Re_v(O_v, \mathbf{x_v}, \mathbf{y_v}, \mathbf{z_v})$, d'origine O_v point de projection du centre de gravité du corps arrière sur la chaussée. De plus, pour simplifier la description des différents mouvements de rotation des deux corps avant et arrière, des repères supplémentaires sont définis comme suit :

- $\Re_s(O_s, \mathbf{x_s}, \mathbf{y_s}, \mathbf{z_s})$ associé au corps arrière, obtenu par un mouvement de rotation de roulis φ par rapport au repère $\Re_v$,
- $\Re_\epsilon(B, \mathbf{x}_\epsilon, \mathbf{y}_\epsilon, \mathbf{z}_\epsilon)$ associé au corps avant, obtenu par un mouvement de rotation d'angle constant ϵ qui représente l'angle de chasse par rapport au repère $\Re_s$,
- $\Re_\delta(B, \mathbf{x}_\delta, \mathbf{y}_\delta, \mathbf{z}_\delta)$ associé au corps avant, obtenu par un mouvement de rotation de guidon δ par rapport au repère $\Re_\epsilon$.

Ces repères sont de grande utilité pour déterminer les différentes quantités géométriques et cinématiques du véhicule deux-roues. Cependant, cette représentation est moyennement simplifiée puisqu'elle ne couvre pas la totalité des mouvements de la moto et notamment ceux des suspensions avant et arrière, le tangage et autres degrés de liberté liés aux flexibilités de la moto. Par ailleurs, pour la suite de nos travaux, elle s'avère suffi-

sante pour relever les différentes nuances entre la dynamique des véhicules automobiles et motocycles.

7.4.2.2 Angle de carrossage et de direction effective

L'une des particularités des véhicules deux-roues réside dans le système de direction, essentiellement destiné à produire des variations dans la force latérale afin de changer la direction de la moto, de poursuivre une trajectoire donnée et aussi de garder l'équilibre. D'un point de vue géométrique, un guidon classique est décrit par trois paramètres essentiels : l'angle de chasse ϵ, l'offset de la fourche c et la géométrie de la roue. De ces paramètres, on peut déduire la chasse géométrique t_g définie comme la distance entre le point de contact pneu-chaussée et l'axe de rotation du guidon.

D'un point de vue cinématique, le comportement des véhicules deux-roues présente également quelques aspects particuliers différents de ceux des véhicules automobiles. Un mouvement de rotation du guidon, à partir d'une position du véhicule parfaitement verticale (angle de roulis $\varphi = 0$), engendre un mouvement de tangage du corps avant et un mouvement de roulis des deux corps. Toutefois, ce mouvement de tangage est négligé par rapport à celui du roulis. De plus, si l'angle de carrossage de la roue arrière est égal à l'angle du roulis (roue non directrice), il n'en est pas de même pour celui de la roue avant. Géométriquement, il est obtenu en projetant le vecteur directeur de l'axe de rotation de la roue avant $\mathbf{y}_\delta$ dans le repère véhicule $\Re_v$ et en utilisant la matrice de rotation $\mathcal{R}_{\delta\to v}$ définie comme suit :

$$\mathcal{R}_{\delta\to v} = \mathcal{R}_\varphi \mathcal{R}_\epsilon \mathcal{R}_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & s\varphi & c\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\epsilon & 0 & s\epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\epsilon & 0 & c\epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\delta & -s\delta & 0 \\ s\delta & c\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7.13}$$

Les colonnes de cette matrice représentent simplement les coordonnées des vecteurs $\mathbf{x}_\delta$, $\mathbf{y}_\delta$ et $\mathbf{z}_\delta$ exprimés dans le repère $\Re_v$, soit :

$$\mathcal{R}_{\delta\to v} = \begin{bmatrix} c\epsilon c\delta & -c\epsilon s\delta & s\epsilon \\ s\epsilon s\varphi c\delta + c\varphi s\delta & -s\epsilon s\varphi s\delta + c\varphi c\delta & -c\epsilon s\varphi \\ -s\epsilon c\varphi c\delta + s\varphi s\delta & s\epsilon c\varphi s\delta + s\varphi c\delta & c\epsilon c\varphi \end{bmatrix} \tag{7.14}$$

Le carrossage de la roue avant, défini comme étant l'angle entre la composante verticale $\mathbf{y}^v_{\delta,z}$ du vecteur $\mathbf{y}^v_\delta$ et le vecteur unitaire $\mathbf{y}^v_\delta$, est exprimé par la simple relation :

$$\gamma_f = \arcsin(\mathbf{y}^v_{\delta,z}) = s\epsilon c\varphi s\delta + s\varphi c\delta \tag{7.15}$$

et celui de la roue arrière, est donné comme suit :

$$\gamma_r = \varphi \tag{7.16}$$

De plus, l'angle de braquage effectif de la roue avant, ou de la direction effective, est décrit comme la projection de la rotation du guidon sur le plan horizontal de la chaussée. Il peut être déterminé par l'expression suivante :

$$\delta_t = -\arctan\left(\frac{\mathbf{y}^v_{\delta,x}}{\mathbf{y}^v_{\delta,y}}\right) = \arctan\left(\frac{c\epsilon s\delta}{-s\epsilon s\varphi s\delta + c\varphi c\delta}\right) \tag{7.17}$$

où $\mathbf{y}^v_{\delta,x}$ et $\mathbf{y}^v_{\delta,y}$ sont respectivement les composantes x et y du vecteur unitaire $\mathbf{y}^v_\delta$ exprimé dans le repère $\Re_v$.

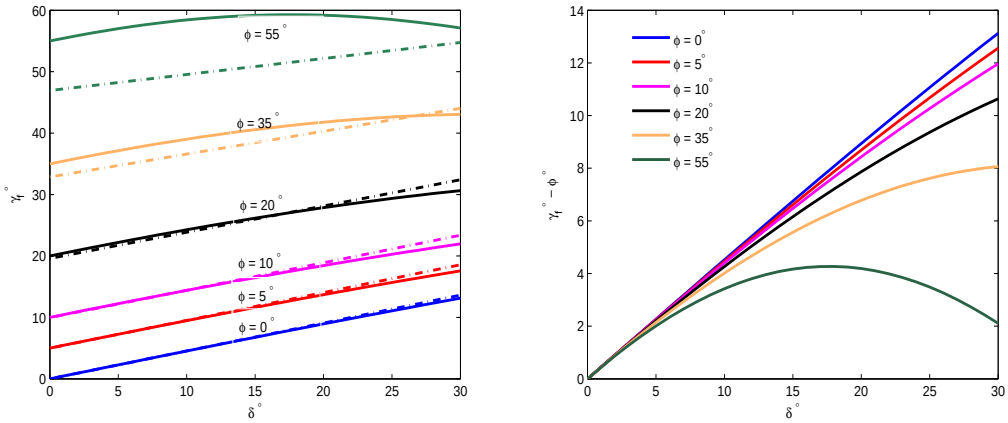

FIGURE 7.12 – *Angle de carrossage γ_f et $\gamma_f - \varphi$ en fonction de l'angle du guidon δ et de diverses valeurs de φ*

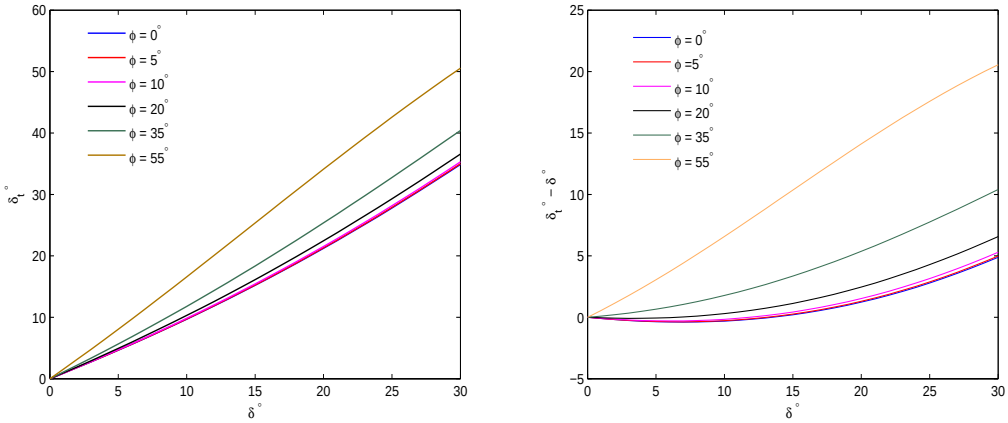

FIGURE 7.13 – *Angle de direction effective δ_t et $\delta_t - \delta$ en fonction de l'angle du guidon δ et de différentes valeurs de φ.*

Dans les phases de conduite en file (angle de roulis inférieur à 10°), les relations entre, d'une part l'angle de carrossage γ_f et l'angle de guidon δ, et d'autre part, l'angle de guidon effectif δ_t et l'angle de guidon δ, sont linéaires (Figure 7.12). En dehors des plages où les variations de l'angle de roulis sont faibles, les relations sont de natures non-linéaires. De plus, la différence $\gamma_f - \varphi$ est plus importante quand δ, l'angle de guidon, augmente et diminue avec l'angle de roulis. Tandis que la différence $\delta_t - \delta$ est plus large avec l'augmentation du roulis et de direction (Figure 7.13). Néanmoins, à l'exception des cas où la vitesse longitudinale est très faible, il est rare de voir l'angle de direction dépasser une dizaine de degrés, par conséquent, dans la modélisation, on peut considérer que l'angle de carrossage de la roue avant et l'angle de direction effective ne sont que, respectivement, l'angle de roulis et celui du guidon.

7.4.2.3 Angles de glissement latéral des pneumatiques

Pour calculer les forces de glissement latéral utilisant l'équation 7.5, il est indispensable de déterminer les angles de glissement pour les roues arrière et avant. Pour cela, il faut exprimer la vitesse du point de contact pneu-sol. Ainsi, pour la roue arrière :

$$\mathbf{V_{C_r}}^v = \mathbf{O_a}\dot{\mathbf{O_v}}^v + \mathbf{O_v}\dot{\mathbf{C_r}}^v = \mathbf{O_a}\dot{\mathbf{O_v}}^v + \Omega^v_{v/a} \times \mathbf{OC_r}^v \tag{7.18}$$

D'après la figure 7.14, $\mathbf{O_v C_r}^v = [-b, 0, 0]^T$:

$$\mathbf{V_{C_r}}^v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y - b\dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7.19}$$

Ainsi, en appliquant la formule 7.4, nous obtenons l'expression de l'angle de glissement latéral α_r de la roue arrière :

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{V_y - b\dot{\psi}}{V_x}\right) \tag{7.20}$$

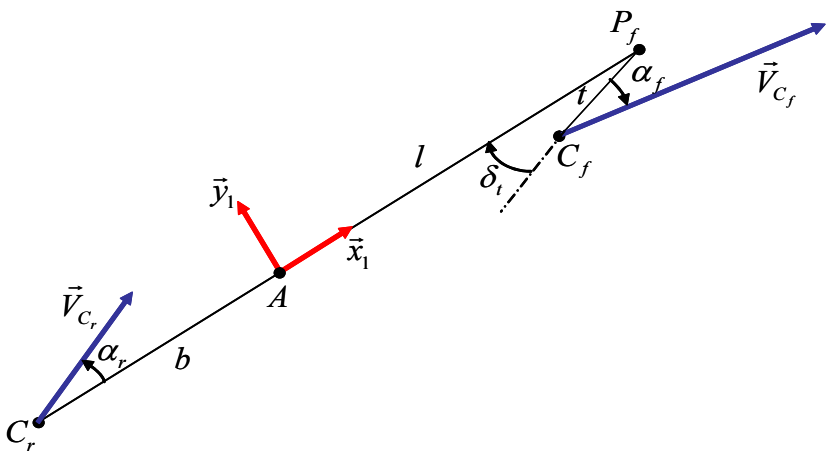

FIGURE 7.14 – *Géométrie de l'interface pneu-sol pour les roues avant et arrière*

A la différence de la roue arrière, le calcul de l'angle de glissement latéral pour la roue avant n'est pas aussi trivial à cause de la géométrie du système de direction. Pour prendre en compte l'angle de direction, on a le choix d'exprimer la vitesse du point de contact pneu-sol C_f, soit dans le repère $\Re_v$, soit dans un repère associé à la roue. Dans le premier cas de figure, on a :

$$\mathbf{V_{C_f}}^v = \mathbf{O_a}\dot{\mathbf{O_v}}^v + \dot{\psi}\mathbf{z_a} \times \mathbf{O_v P_f}^v + \dot{\delta}_t \times \mathbf{P_f C_f}^v \tag{7.21}$$

où $\mathbf{O_v P_f}^v = [l, 0, 0]^T$ et $\mathbf{P_f C_f}^1 = -[tc\delta_t, ts\delta_t, 0]^T$. Tous calculs faits, on obtient :

$$\mathbf{V_{C_f}}^v = \begin{bmatrix} v_x + t\dot{\delta}_t s\delta \\ v_y + l\dot{\psi} - t\dot{\delta}_t c\delta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7.22}$$

De la même manière, l'angle de glissement latéral de la roue avant est exprimé par la formule suivante :

$$\alpha_f = -\delta_t + \arctan\left(\frac{v_y + l\dot{\psi} - t\dot{\delta}_t c\delta}{v_x + t\dot{\delta}_t s\delta}\right) \tag{7.23}$$

où $\dot{\delta}_t$ est obtenu en dérivant l'équation (2.42), comme suit :

$$\dot{\delta}_t = \frac{\dot{\delta} c\epsilon c\varphi + \dot{\varphi} c\epsilon s\delta(s\epsilon c\varphi s\delta + s\varphi c\delta)}{(-s\epsilon s\varphi s\delta + c\varphi c\delta)^2 + c^2\epsilon s^2\delta} \tag{7.24}$$

7.4.3 Analyse de la dynamique d'un deux-roues

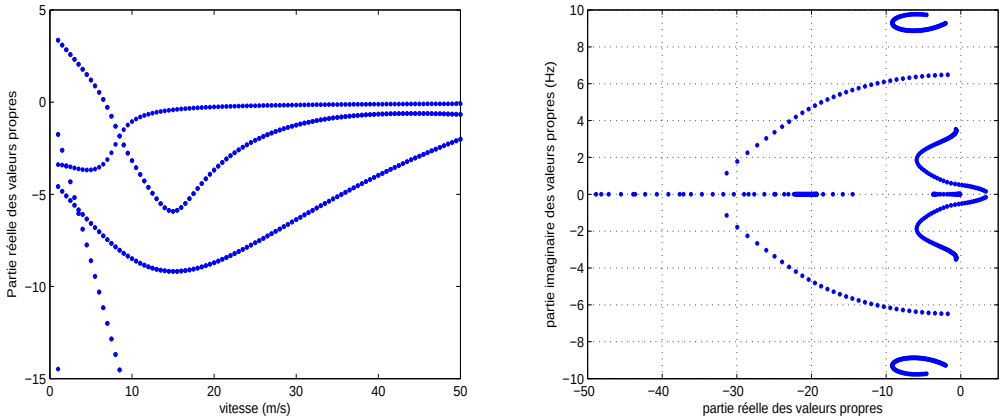

FIGURE 7.15 – *Amortissement et fréquences des différents modes de la dynamique d'un deux-roues (Sharp 71)*

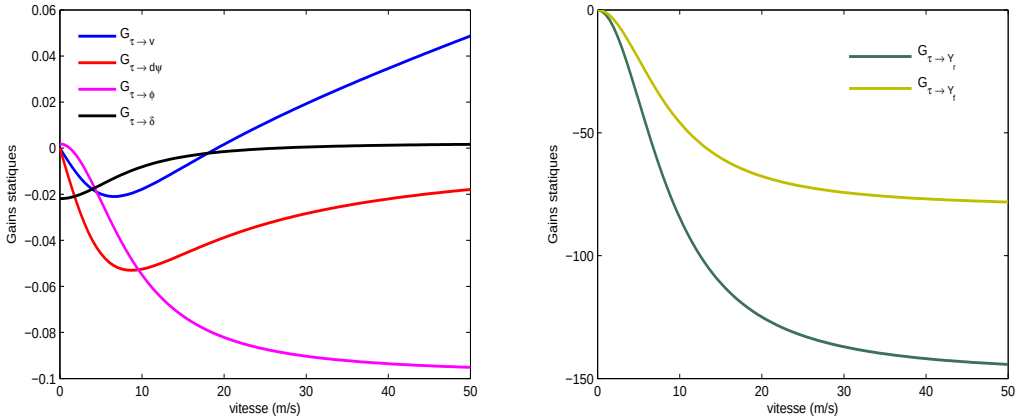

FIGURE 7.16 – *Gains Statiques des fonctions de transfert $G_{\tau\to v}$, $G_{\tau\to\dot{\psi}}$, $G_{\tau\to\varphi}$, $G_{\tau\to\delta}$ en fonction de la vitesse longitudinale*

La figure 7.15 trace les modes du modèle dynamique du véhicule deux-roues. On remarque que ce type d'engin présente une instabilité voire une stabilité critique, en boucle ouverte (sans conducteur) et ce pour un large intervalle de vitesses. Cette conclusion est

toute logique puisque, dans ce cas de figure, tout équilibre nécessite trois points d'appui. D'un autre côté, l'amortissement des pôles associés est plus faible lorsque la vitesse augmente. De plus, on voit l'apparition de trois modes bien séparés, définis comme suit :

- "*Capsize*" : un mode non oscillant dans lequel la roue avant est braquée dans la direction du roulis mais pas suffisamment pour éviter une chute. Il est bien amorti en basse vitesse mais avec un amortissement décroissant au-delà de $5m/s$, par conséquent, il est possible pour un conducteur de le contrôler et de le stabiliser.
- "*Wobble*" : un mode oscillant rapide concernant le système de direction, dont la fréquence est comprise entre 4-10Hz, bien amorti en basses et moyennes vitesses, et modérément en vitesses élevées. Il se produit quand le guidon commence à osciller d'un coté à l'autre jusqu'à la chute de la moto.
- "*Weave*" : un mode instable en basse vitesse (inférieure à $5m/s$), bien amorti en vitesses moyennes et stable au delà de $30m/s$. Sa fréquence se situe entre 0 et 4Hz, et il affecte l'ensemble du véhicule deux-roues. Dans ce mode, la direction est en déphasage de 180° avec le lacet et de 90° avec le roulis.

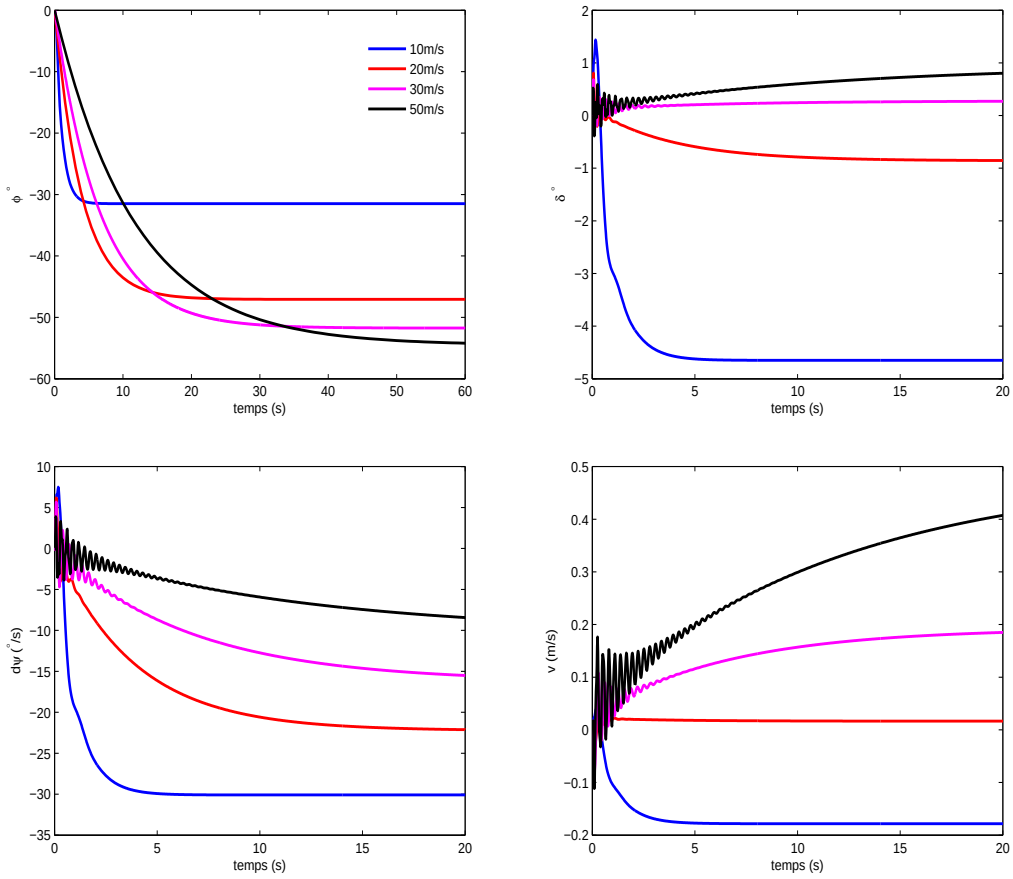

FIGURE 7.17 – *Réponse indicielle des fonctions de transfert $G_{\tau\to\varphi}$, $G_{\tau\to\delta}$, $G_{\tau\to\dot{\psi}}$ et $G_{\tau\to v}$ pour un couple échelon de 10N.m*

Les figures 7.16 et 7.17 tracent les gains statiques des différentes fonctions de transfert ainsi que leurs réponses indicielles pour un couple de type échelon fournit par le conduc-

teur et d'amplitude $10N.m$. On peut résumer, pour chacune des fonctions de transfert, les divers commentaires dans les points suivants :

- $G_{\tau \to v}$: Le gain statique évolue en sens inverse de l'entrée de couple guidon jusqu'à une vitesse approximative de $20m/s$ à partir de laquelle il change de signe et augmente avec l'accroissement de la vitesse. Ce comportement est mis en évidence sur le tracé de la réponse indicielle qui présente des oscillations accrues pour une vitesse de $50m/s$.
- $G_{\tau \to \dot{\psi}}$: Le gain statique a un comportement semblable à celui rencontré dans le cas de l'automobile mais avec un signe opposé à l'entrée du couple guidon. Il augmente en basse vitesse jusqu'à une vitesse d'environ $7m/s$ puis diminue quand la vitesse continue d'augmenter. Le signe négatif montre la particularité des véhicules deux-roues pour lesquels il faut exercer un couple dans le sens inverse du virage. Cette notion constitue la différence majeure avec la conduite automobile. Néanmoins, à des vitesses élevées, la réponse indicielle présente des oscillations avant d'être bien amortie. Cela montre que le degré de liberté du lacet est fortement couplé et influencé par le mouvement latéral et l'angle de braquage du guidon.
- $G_{\tau \to \varphi}$: Ce degré de liberté semble bien découplé des autres à cause de l'absence de vibrations observées dans d'autres tracés de réponse indicielle. Le gain statique croit avec la vitesse, mais toujours dans le sens inverse. Ce constat est spécifique à la conduite des véhicules deux-roues, puisque, pour prendre un virage, il faut appliquer un couple dans le sens inverse du virage et également incliner la moto dans le sens du virage. De plus, plus la vitesse augmente, plus il est nécessaire d'incliner la moto pour maintenir l'équilibre.
- $G_{\tau \to \delta}$: Enfin, pour le braquage du guidon, on remarque qu'au delà d'une vitesse d'environ $15m/s$, le gain statique diminue jusqu'à devenir quasi-nul, indiquant qu'à vitesses élevées, le guidon ne bouge presque pas. C'est la raison pour laquelle un véhicule deux-roues se pilote plutôt grâce au couple exercé par le conducteur sur le guidon que par l'angle de braquage du guidon.

Ces résultats numériques obtenus par simulation d'un modèle mathématique peuvent être interprétés, physiquement comme suit :

- **Equilibre** : Un deux-roues maintient un état d'équilibre tant que les forces externes (gravité, inertie, centrifuge et aérodynamique) annulent celles de la réaction pneu/sol. Dans une conduite en ligne droite, cette stabilité est assurée par le conducteur en contrôlant la vitesse longitudinale. En revanche, dans un virage, un motard applique un couple au guidon, voire un mouvement latéral de son buste pour contrôler l'angle de roulis de la moto. A hautes vitesses, un petit angle du guidon déplace latéralement et de manière rapide, le point de contact pneu-sol, tandis que de larges mouvements de guidon sont nécessaires pour le même effet à petite vitesse. Donc, plus la vitesse augmente, plus il est simple de garder l'équilibre.
- **Effet gyroscopique** : Cet effet a un rôle prépondérant dans la conception du système de direction, car il permet d'assister le braquage de la roue avant lors de la prise de virage. Ce phénomène, appelé "précession", se produit à une vitesse inversement proportionnelle à celle de rotation de la roue. Par conséquent, en basse vitesse, l'effet de la précession est plus important, conduisant à des oscillations rapides du guidon. D'un autre coté, l'effet gyroscopique contribue à générer un mouvement de roulis de la roue avant, et ainsi donne naissance à une caractéristique essentielle de la conduite d'une moto, c'est-à-dire, le "contre-braquage". Donc, un braquage à gauche

développe un moment de roulis à droite et vice versa. Toutefois, son amplitude est d'ordre faible comparée à d'autres moments, mais son caractère transitoire est crucial dans la prise de virage.

– **Conduite en virage** : Dans un virage, un véhicule deux-roues est, essentiellement, soumis à quatre forces majeures, la force centrifuge, la force de gravité, la charge verticale et la force de glissement latéral. La condition d'équilibre est atteinte lorsque le torseur extérieur de tous ces efforts est nul [35, 33]. Cette condition est concrétisée lorsque la moto est inclinée d'un angle de roulis φ, fonction de la vitesse longitudinale v_x et de la courbure du virage ρ , comme suit :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\rho v_x^2}{g}\right) \tag{7.25}$$

Par exemple, il faut une inclinaison de $40°$ pour réaliser un virage à $50m$ de rayon avec une vitesse de $20m/s$. Toutefois, pour réduire l'angle de roulis nécessaire, le conducteur utilise son buste pour créer un transfert de masse dans le même sens que le virage, et donc, moins pencher la moto et ainsi diminuer les risques de glissement latéral des roues.

7.4.4 Modifications apportées au modèle de Sharp 71

Afin de tester nos différentes applications, simulateurs de conduite moto ou système d'alerte pour la sécurité préventive, nous avons apporté diverses modifications à ce modèle de référence, nous les résumons comme suit :

1. Le modèle de Sharp 71 étant linéaire (petites perturbations), nous avons préféré garder les aspects non-linéaires parfois très utiles. Ces non-linéarités s'avèrent parfois importantes, par exemple dans la synthèse de vitesse limite autorisée pour un deux roues lors de la prise de virage.
2. Le modèle de référence est un modèle quasistatique acceptant seulement des vitesses linéaires constantes (très faible domaine de stabilité). Pour pallier cet inconvénient, nous avons inséré un modèle longitudinal pour la synthèse de la dite vitesse à partir des vitesses de rotation des roues.
3. En lien avec le point précédent, les entrées de notre modèle sont : le couple conducteur ainsi que les vitesses de rotation des roues.
4. Intégration de la géométrie de route : dévers et pente. Ces paramètres ont été ignorés dans le modèle de référence. Par contre, leur impact sur le comportement du véhicule ainsi que sur les vitesses limites autorisées, dans certains cas, est prépondérant.
5. Intégration et calcul des forces (latérales et longitudinales) issues du pneumatique par la formule magique de Pacejka (adaptée au cas de la moto, en incluant l'effet de l'angle du carrossage). Dans le modèle de référence, la route est considérée plane et les roues comme étant des disques fins (un point de contact). Ces dernières suppositions supprimeraient plusieurs effets dynamiques tels que les moments d'auto-alignement et de renversement.
6. Intégration du transfert de charge comme étant une quantité dépendant de l'accélération longitudinale seulement (sans intégrer l'effet de la suspension ni passer par les modèles vertical et tangage, ignorés dans notre modèle).

7. Calcul de l'adhérence, mobilisée par le conducteur, en utilisant la formule de Burkhardt [165].

Le modèle que nous avons proposé, [35], garde le même nombre de corps que le modèle original mais fait intervenir quelques dynamiques suite à son augmentation (dynamique longitudinale).

7.5 Développement de modèle dynamique pour les applications temps-réel : Technique de Newton-Euler récursive

Dans cette partie, je décris une technique de modélisation dynamique d'un véhicule deux roues que nous avons développé afin de dériver les équations de mouvements en se basant sur l'approche de Newton-Euler récursive, [30], [31]. Cette approche est adaptée aux systèmes multi-corps à structure arborescente. L'avantage principal de cette approche réside dans le fait que le modèle dynamique dérivé est constitué d'un faible nombre d'opérations arithmétiques devant être mises à jour à chaque pas de temps, donc une synthèse très rapide comparée aux méthodes classiques. Le modèle dynamique résultant prend en considération les principales forces et des moments externes affectant le comportement dynamique de la moto : pneumatique, aérodynamique, suspensions, les contraintes de contact et entrées de commande.

Ces caractéristiques font que cette approche est plus adaptée pour les applications temps-réel telles que la simulation de conduite. Donc, le besoin d'un algorithme dynamique rapide devient pertinent afin de remplir les contraintes liées au temps d'exécution [166].

7.5.1 Géométrie du véhicule deux roues

Dans ce travail, nous avons considéré que la moto est constituée de six parties rigides. La flexibilité des pneus est modélisée comme étant un système de liaison constitué de raideur-amortisseur. Les corps constituant la moto sont : corps central (selle et moteur), la partie supérieure avant (guidon avec la partie supérieure du système de suspension avant), la partie inférieure (la partie inférieure du système de suspension avant), les pneus avant et arrière et enfin le barre oscillante. La plupart des corps sont reliés entre eux par des liaisons pivot, sauf la partie supérieure avant et la partie inférieure qui sont interconnectées par une liaison prismatique. Par conséquent, la configuration de la moto peut être entièrement représentée par un vecteur de configuration à 11 DDL comme indiqués sur la figure 7.18. Les variables de configuration sont représentées dans un repère local orthonormé attaché à chaque corps de la moto. La position et l'orientation de la selle sont paramétrées par rapport à un référentiel inertiel par $(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$ où (θ, ϕ, ψ) sont les angles d'Euler. En outre, le vecteur de configuration contient l'angle de braquage δ, l'allongement de la suspension avant L, l'angle de la barre oscillante θ_s et enfin, angles de rotation des pneus avant et arrière θ_f et θ_r.

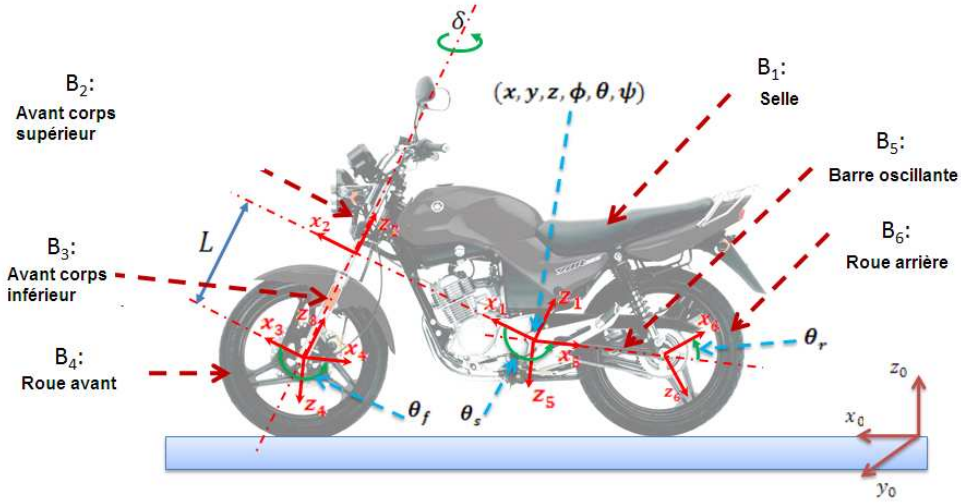

FIGURE 7.18 – *Corps et degrés de liberté considérés du véhicule deux roues*

7.5.2 Dynamique des véhicules deux roues

Une application triviale des formalismes classiques de la dynamique pour les systèmes multi-corps peut aboutir à des modèles inefficaces du fait du nombre élevé d'opérations arithmétiques (équations algébro-différentielles). Cependant, les techniques récursives présentent une autre alternative pour réduire considérablement la charge de calcul et devraient permettre un calcul en temps réel de la dynamique directe de la moto. Dans [167] et [168], Recursive Newton-Euler Algorithm "RENA", ont démontré la rapidité de cet algorithme. A l'origine, cette technique a été développée pour résoudre le modèle de la dynamique inverse d'un bras manipulateur (chaîne cinématique ouverte) avec une base fixe à des fins de contrôle. En projetant la dynamique de chaque corps dans son repère local, les accélérations des variables articulaires peuvent être calculées facilement sans qu'il soit nécessaire de calculer la matrice d'inertie pour l'ensemble du système et l'inverser. Numériquement, cette technique est plus stable que celle utilisant l'inversion de la matrice d'inertie et s'avère très rapide lorsque le système a plus de 9 DDL, [167].

Pour illustrer cette technique, considérons le système multi-corps représenté par la figure 7.19. Soit $\mathbb{V}_i = (v_i^T, \omega_i^T)^T$ le torseur cinématique du corps B_i où v_i est sa vitesse linéaire et ω_i est sa vitesse angulaire. $\mathbb{F}_i^e = (F_i^{eT}, M_i^{eT})^T$ est le vecteur des efforts extérieurs agissant sur B_i, $\mathbf{L}_i$ le vecteur position de $i+1^{\text{ème}}$ articulation par rapport à $i^{\text{ème}}$ articulation, $\mathbf{S}_i$ est le vecteur position du centre de gravité, ${}^i\mathbf{R}_{i-1}$ la matrice de transformation de B_{i-1} à B_i, $\mathbb{F}_i = (F_i^T, M_i^T)^T$ est la force de liaison de B_i appliquée par B_{i-1}, m_i et $\mathbf{J}_i$ sont respectivement la masse et le tenseur d'inertie du corps B_i, q_i est la $i^{\text{ème}}$ variable articulaire et τ_i est la force / couple de l'actionneur agissant sur l'articulation i. Dans la suite, l'expression ${}^i\mathbf{X}_j$ signifie que le vecteur $\mathbf{X}_j$ est projeté dans le repère associé au corps B_i.

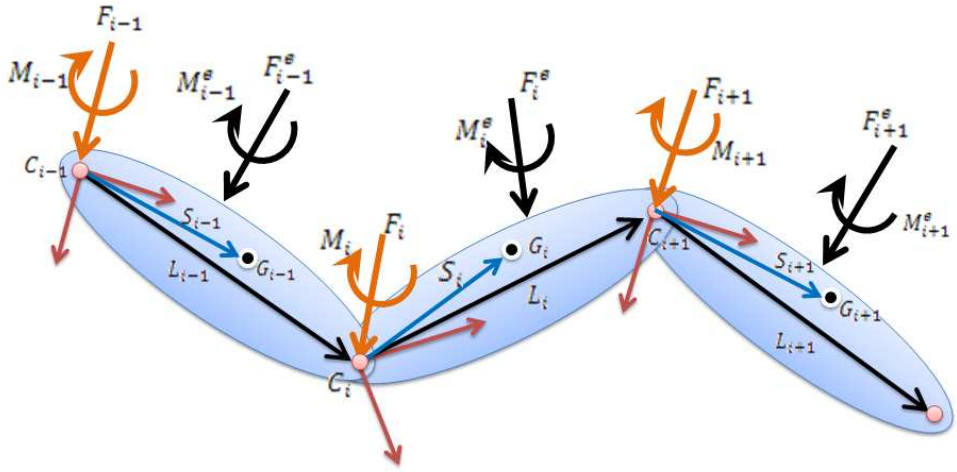

FIGURE 7.19 – *Système multi-corps à chaîne ouverte*

Soit σ_i, une variable binaire définissant le type de liaison, définie par :

$$\sigma_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la liaison est prismatique} \\ 0 & \text{Si la liaison est pivot} \end{cases} \tag{7.26}$$

Soit ${}^i\mathbb{T}_{i-1}$, une matrice de dimension 6×6, définie comme :

$${}^i\mathbb{T}_{i-1} = \begin{pmatrix} {}^i\mathbf{R}_{i-1} & -{}^i\mathbf{R}_{i-1}{}^{i-1}\tilde{\mathbf{L}}_{i-1} \\ 0_{3\times3} & {}^i\mathbf{R}_{i-1} \end{pmatrix} \tag{7.27}$$

où $\tilde{}$ est l'opérateur de la matrice antisymétrique du vecteur $\mathbf{v} = (x, y, z)^T$. Cette matrice est définie par :

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}\times = \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \tag{7.28}$$

Soit ${}^i\mathbb{J}_i$, la matrice d'inertie du corps B_i, donnée par :

$${}^i\mathbb{J}_i = \begin{pmatrix} m_i\mathbf{I}_{3\times3} & -m_i{}^i\tilde{\mathbf{S}}_i \\ m_i{}^i\tilde{\mathbf{S}}_i & \mathbf{J}_i \end{pmatrix} \tag{7.29}$$

La présente technique opère par trois récurrences. La première itération, les vitesses, le terme de Coriolis, les forces centrifuges et les efforts externes sont calculés pour chaque corps (de la base à l'effecteur). La deuxième itération calcule la somme des forces et les matrices d'inertie auxquelles est soumise chaque articulation (de l'effecteur à la base). Enfin, la troisième itération l'accélération de chaque articulation et le torseur dynamique appliqué à la même articulation. En considérant que $\omega_0 = \dot{\omega}_0 = 0$ et $\mathbb{V}_0 = (-\mathbf{g}, 0_{1\times3})^T$, où $\mathbf{g}$ est la gravité. Alors, l'algorithme récursif de Newton-Euler pour la dynamique directe est donné par :

Algorithme 1 **Première Itération** **for** $i = 1 \rightarrow n$ **do**

$$
\begin{aligned}
&{}^{i}\mathbb{V}_{i-1} = {}^{i}\mathbb{T}_{i-1}{}^{i-1}\mathbb{V}_{i-1} + \dot{q}_i{}^{i}\mathbf{a}_i \\
&{}^{i}\gamma_i = \begin{bmatrix} {}^{i}\mathbf{R}_{i-1}\left({}^{i-1}\omega_{i-1} \times \left({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{L}_{i-1}\right)\right) \\ +2\sigma_i\left({}^{i}\omega_{i-1} \times \dot{q}_i{}^{i}\mathbf{k}_i\right); \\ \bar{\sigma}_i\left({}^{i}\omega_{i-1} \times \dot{q}_i{}^{i}\mathbf{k}_i\right) \end{bmatrix} \\
&{}^{i}\beta_i = {}^{i}F_i^e - \begin{bmatrix} {}^{i}\omega_i \times \left({}^{i}\omega_i \times m_i{}^{i}\mathbf{S}_i\right) \\ {}^{i}\omega_i \times \left({}^{i}\mathbf{J}_i{}^{i}\omega_i\right) \end{bmatrix}
\end{aligned}
$$

Algorithme 2 **Deuxième Itération** **for** $i = n \rightarrow 1$ **do**

$$
\begin{aligned}
&\mathbf{H}_i = {}^{i}\mathbf{a}_i^{T\,i}\mathbb{J}_i^{*\,i}\mathbf{a}_i \\
&{}^{i}\mathbb{K} = {}^{i}\mathbb{J}_i^* - {}^{i}\mathbb{J}_i^{*\,i}\mathbf{a}_i\mathbf{H}_i^{-1\,i}\mathbf{a}_i^{T\,i}\mathbb{J}_i^* \\
&{}^{i}\alpha_i = {}^{i}\mathbb{K}_i{}^{i}\gamma_i + {}^{i}\mathbb{J}_i^{*\,i}\mathbf{a}_i\mathbf{H}_i^{-1}\left(\tau_i + {}^{i}\mathbf{a}_i^{T\,i}\beta_i^*\right) - {}^{i}\beta_i^* \\
&\textit{if } i \neq 1 \textit{ then} \\
&{}^{i-1}\beta_{i-1}^* = {}^{i-1}\beta_{i-1} - {}^{i}\mathbb{T}_{i-1}^T{}^{i}\alpha_i \\
&{}^{i-1}\mathbb{J}_{i-1}^* = {}^{i-1}\mathbb{J}_{i-1} + {}^{i}\mathbb{T}_{i-1}^T{}^{i}\mathbb{K}_i{}^{i}\mathbb{T}_{i-1}
\end{aligned}
$$

Algorithme 3 **Troisième Itération** **for** $i = 1 \rightarrow n$ **do**

$$
\begin{aligned}
&{}^{i}\dot{\mathbb{V}}_{i-1} = {}^{i}\mathbb{T}_{i-1}{}^{i-1}\dot{\mathbb{V}}_{i-1} \\
&\ddot{q}_i = \mathbf{H}_i^{-1}\left[-{}^{i}\mathbf{a}_i^{T\,i}\mathbb{J}_i^*\left({}^{i}\dot{\mathbb{V}}_{i-1} + {}^{i}\gamma_i\right) + \tau_i + {}^{i}\mathbf{a}_i^{T\,i}\beta_i^*\right] \\
&{}^{i}\mathbb{F}_i = \begin{bmatrix} {}^{i}\mathbf{F}_i \\ {}^{i}\mathbf{M}_i \end{bmatrix} = {}^{i}\mathbb{K}_i{}^{i}\dot{\mathbb{V}}_{i-1} + {}^{i}\alpha_i \\
&{}^{i}\dot{\mathbb{V}}_i = {}^{i}\dot{\mathbb{V}}_{i-1} + {}^{i}\mathbf{a}_i\ddot{q} + {}^{i}\gamma_i
\end{aligned}
$$

En remplaçant la suspension arrière par deux forces agissant sur la selle et la barre oscillante, la moto peut être considérée comme un système avec une chaîne ouverte ayant une base flottante. Par conséquent, l'algorithme peut être utilisé pour calculer les accélérations des variables suivantes $(\delta, L, \theta_f, \theta_s, \theta_r)$, et les forces agissant sur leurs articulations correspondantes aux chaînes ouvertes (B_2, B_3, B_4) et (B_5, B_6). A ce stade, les accélérations restantes peuvent être calculées en considérant le corps central seul, et remplacer les deux chaines ouvertes (à l'avant et à l'arrière) par leurs torseurs dynamiques $(\mathbb{F}_2, \mathbb{F}_5)$ au niveau de la deuxième et de la cinquième articulation. Le modèle de dynamique direct décrivant les mouvements du corps central est alors donné par :

$$
\begin{aligned}
{}^{1}\dot{\mathbb{V}}_1 &= {}^{1}\mathbb{J}_1^{-1}\left(\mathbf{C}(\eta, {}^{1}\mathbb{V}_1) + \mathbf{G}(\eta) + {}^{1}\mathbb{F}_2 + {}^{1}\mathbb{F}_5 + {}^{1}\mathbb{F}_{rs}\right) \\
\dot{\eta} &= \mathbb{R}{}^{1}\mathbb{V}_1
\end{aligned}
\tag{7.30}
$$

où $\eta = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ est le vecteur de configuration du corps central. ${}^{1}\mathbb{V}_1$ est le vecteur des vitesses linéaire et angulaire du corps central, calculées dans le repère local. ${}^{1}\mathbb{J}_1$ est sa matrice d'inertie exprimée dans le même repère. **C** et **G** sont respectivement les torseurs de forces centrifuge/Coriolis et celle liée au poids. $\mathbb{F}_{rs}$ est la force de suspension agissant sur le corps central. $\mathbb{R}$ est la matrice de transformation du repère lié à B_1 au repère inertiel $\mathcal{R}_0$, [169].

7.5.3 Résultats de simulations

Comme nous l'avons abordé au début de ce chapitre (section 7.3.1, les forces extérieures affectant le comportement d'un véhicule deux roues sont nombreuses : interaction pneu-chaussée, forces aérodynamique, etc.

En se basant sur le modèle de Pacejka pour le contact pneu chaussée, nous avons réalisé des simulations (figures 7.20, 7.21 et 7.22) pour illustrer la forme des forces de glissement latéral F_y et longitudinal F_x ainsi que le moment d'auto-alignement M_z en fonction du facteur de glissement κ (α_r est angle de dérive), [134]. Ces simulations ont été réalisées pour un pneu de type 160/70 (propriétés physiques et données extraites de [170]).

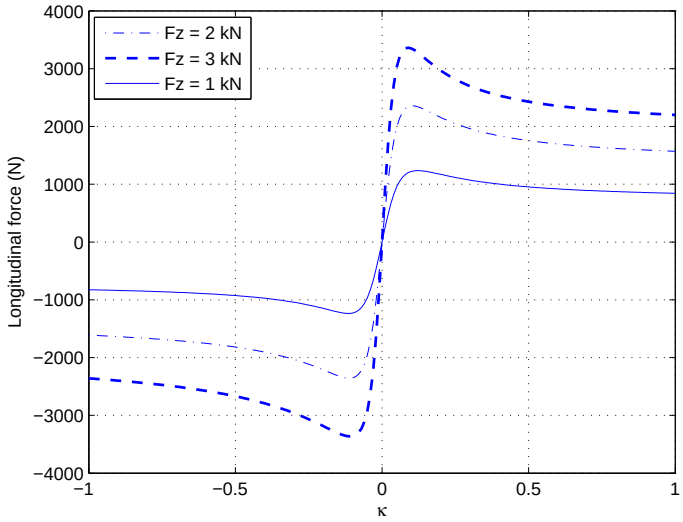

FIGURE 7.20 – *Force longitudinale F_x vs κ pour des forces verticales $F_z = 1, 2, 3\ kN$*

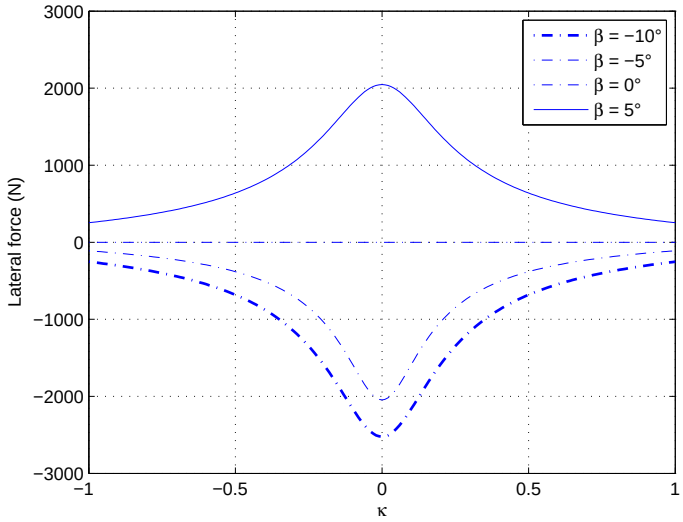

FIGURE 7.21 – *Force latérale F_y vs κ pour $\beta = 5°, 0°, -5°, -10°$*

Pour de tester le comportement du modèle dynamique développé, nous avons synthétisé un conducteur automatique réalisé à l'aide d'un contrôleur linéaire type PID pour la régulation de la vitesse longitudinale. Ce contrôleur agit directement sur la vitesse du pneu arrière en appliquant une accélération/freinage. Le couple de contrôle est ensuite

passé à travers un filtre du premier ordre pour émuler le retard de la réaction moteur, et délimité par le couple maximal admissible par le moteur au niveau du pneu arrière.

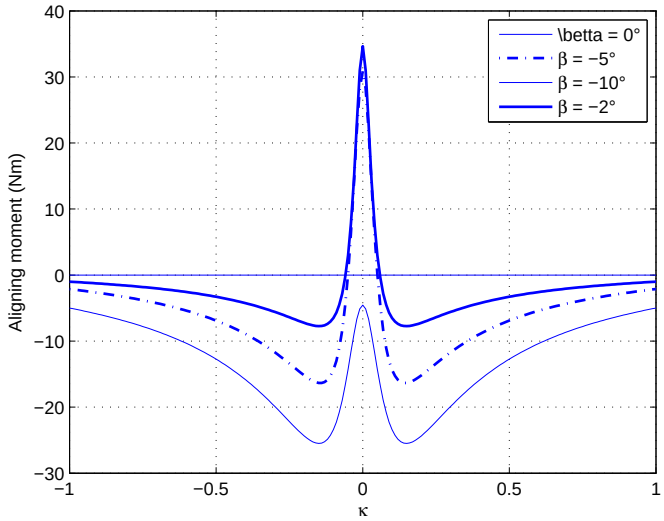

FIGURE 7.22 – *Moment d'auto-alignement M_z vs κ pour $\alpha_r = 0°, -2°, -5°, -10°$*

Durant cette simulation, le profil de vitesse souhaité se compose de trois phases principales, la phase d'accélération jusqu'à $30m/s$, la phase de décélération à $15m/s$, et enfin une phase d'accélération de nouveau jusqu'à $20m/s$, figure 7.23. Dans cette figure, l'erreur entre le profil de vitesse désirée et celle de la moto sont différentes au niveau des trois phases. Cette erreur s'accroit quand la vitesse longitudinale est encore plus élevée. L'origine de cet effet est liée à la force de traînée aérodynamique qui est proportionnelle au carré de la vitesse moto. La figure 7.24, nous observons le couple demandé par le pilotage automatique et celui appliqué à la roue arrière. L'effet du retard, ainsi que la limitation du couple, peuvent être observés sur le temps de convergence du profil de vitesse. Figure 7.25 montre les forces motrices générées par les modèles de pneumatiques avant et arrière.

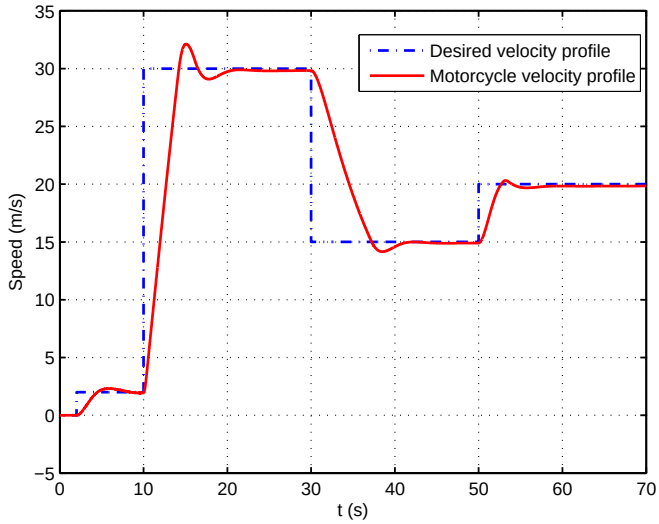

FIGURE 7.23 – *Vitesse de référence / Vitesse du modèle moto*

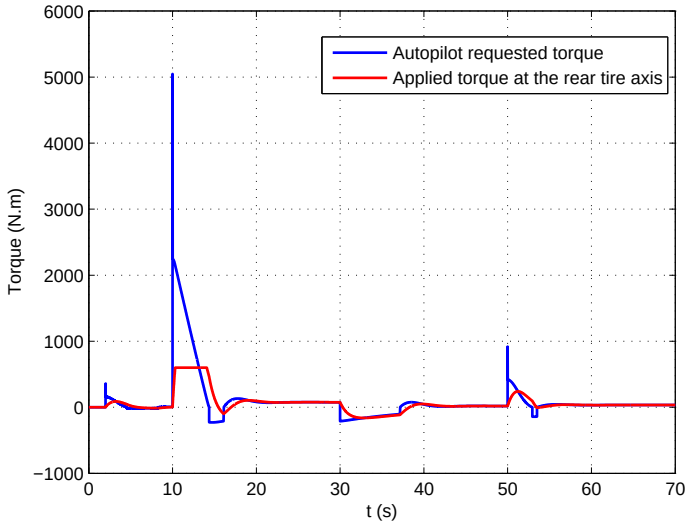

FIGURE 7.24 – *Comparaison entre la consigne et le régime moteur délivré*

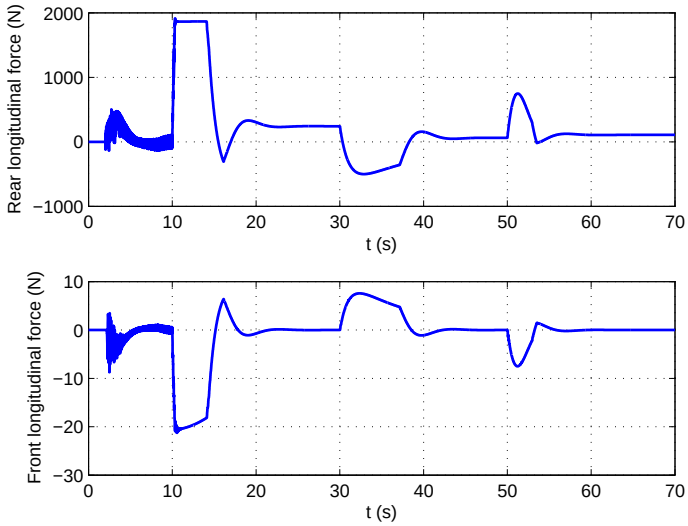

FIGURE 7.25 – *Forces longitudinales appliquées aux pneus avant et arrière*

7.5.4 Discussion

Nous avons présenté une synthèse d'un modèle dynamique pour véhicule deux roues basée sur un algorithme récursif de Newton-Euler. Du fait de sa rapidité, cette technique semble très appropriée pour les applications temps, telles que la simulation de conduite où le retard entre les consignes du conducteur et les réponses de la plate-forme de simulation peut s'avérer fatal et causer des cinétoses (mal de simulateur suite à des difficultés d'interprétation visio-kinesthésiques).

Les résultats de simulations n'ont concerné qu'une partie de la dynamique pour des raisons d'équilibre et de stabilité. Nous travaillons à introduire un contrôle pour le mouvement de roulis ainsi que l'implantation de cet algorithme récursif sur une plate-forme de simulation afin de réaliser une comparaison quantitative avec d'autres modèles synthétisés classiquement.

En parallèle de cette technique, j'ai mené une collaboration avec M. Imine (LCPC-Paris) et M. Merzouki (LAGIS-Lille) sur la modélisation des véhicules deux roues en faisant appel aux techniques de Bond Graph. Ce formalisme présente plusieurs avantages importants à savoir : la modularité de la modélisation des systèmes, puissant outil pour les systèmes multi-physiques, etc. Les modèles mathématiques obtenus par l'approche Bond Graph peuvent être améliorés sans avoir besoin de réécrire des équations, mais par un simple ajout graphique des éléments physiques. Le manque de maîtrise de cet outil nous a empêché d'avancer efficacement sur ce point et nous n'avons pu réaliser qu'une partie de la dynamique moto ainsi que la partie de la motorisation. La première partie du travail a été réalisée dans le cadre d'un stage de Master2 de l'université d'Orsay.

7.6 Sécurité préventive pour les conducteurs des véhicules deux roues

Les statistiques des accidents de moto depuis plusieurs années montrent que les usagers des deux-roues motorisés sont parmi les plus vulnérables sur la route : en moyenne

1400 tués par an depuis 20 ans, avec une augmentation de 14% en 2002. Et selon les dernières statistiques, le nombre de tués chez les motocyclistes n'a pas baissé alors que de nets progrès ont été constatés chez les conducteurs de voitures. Il reste que le risque d'être tué dans un accident est 21 fois plus élevé pour un motocycliste que pour un conducteur de voiture de tourisme.

Les systèmes de sécurité passifs et actifs (ABS, ESP, ceintures de sécurité, airbags, etc.) représentent une avancée majeure en terme de sécurité. Ils sont de plus en plus développés et installés sur les véhicules de tourisme et commencent à poindre sur les véhicules de deux roues motorisés. S'il est clair que ces systèmes ont une efficacité avérée, aucune information n'existe quant à leur exploitation réelle par les usagers courants. On peut toutefois penser que ces dispositifs sont peu ou mal employés au vue de l'exemple automobile. En effet, il a été constaté qu'au début du déploiement de l'ABS sur les véhicules automobiles, seule 15% de la population exploitait pleinement le potentiel de ce système d'assistance au freinage (Rapport LAB GIE PSA Peugeot Citroën/Renault, 1999). L'une des conclusions des études menées dans le projet RIDER (financé par le ministère de la recherche, le CNSR et la Fondation MAIF) montre, d'autre part, que l'apprentissage et la maîtrise des systèmes d'assistance passent nécessairement par l'information et la formation des utilisateurs. De plus, bon nombre d'accidents sont la cause directe d'une méconnaissance des conducteurs de deux roues des risques encourus dans certaines situations de conduite et des conséquences dramatiques en terme lésionnel qu'elles peuvent provoquer.

Afin d'apporter nos solutions en vue de la résolution des problèmes précités, nous avons mené des études sur, d'une part, la sécurité préventive par la proposition d'un système d'alertes capable d'anticiper les situations de risques, et d'autre part, la mise en place d'outils de formation pour les conducteurs tels que les simulateurs de conduite (ce point sera développé dans le prochain chapitre).

7.6.1 Synthèse de travaux de recherches sur les deux roues motorisés

La synthèse présentée ci-dessous dresse un état des lieux succinct sur les différents travaux de recherche entrepris sur les deux-roues motorisés, d'une part, et identifie les acquis et les manques dans ce domaine, d'une autre part. L'engouement des chercheurs pour ce type de véhicule n'est pas nouveau et implique plusieurs thèmes disciplinaires. Je m'intéresserai dans cette partie à quelques points importants, que sont :

- Le motard et le statut d'usager vulnérable : quelques travaux sur l'accidentologie.
- L'infrastructure : conçue spécifiquement pour les voitures de tourisme et non pas pour les deux roues.
- La dynamique moto et le comportement du pilote : face aux situations de risque.
- L'équipement de protection.

7.6.1.1 Le motard et le statut d'usager vulnérable

En France, rares sont les institutions de recherche, qui s'intéressaient à l'accidentologie des deux-roues motorisés. Avant 2000, La plupart des études ont été réalisées à partir soit des données nationales d'accidents, soit en se basant sur les procès-verbaux d'accidents mortels. Faute de quoi, la majorité de ces études, [171, 172, 173, 174], ne peuvt donner qu'un bilan global de l'accidentologie pour ce type d'usager en présentant des statistiques qui caractérisent les principaux marqueurs de l'insécurité : vitesse, port du

casque, éclairage, responsabilité, âge de l'usager, type de véhicule, etc. On trouve très peu de travaux sur l'évaluation du risque [175, 174].

Depuis l'année 2000, la France dispose d'études détaillées d'accident dédiées aux deux-roues permettant de compléter le précédent système d'information. Cette nouvelle base permettrait aux chercheurs de mener des études notamment en ce qui concerne les scénarios types d'accident vu côté conducteur [176], ou vu côté situation accidentelle [177].

Au niveau International, plusieurs travaux ont été réalisés dans les années 70 dictés par le nombre de victimes de la route utilisant les deux roues. Parmi les travaux importants, nous citons celui du Professeur Otte (Allemagne) qui possède la plus importante base de données d'accidents au monde. En Angleterre, les auteurs de [178, 179] ont réalisé des études à partir des investigations sur les accidents des deux roues.

Aujourd'hui, l'usager vulnérable (piétons, cyclistes, motocyclistes) est une cible clairement identifiée tant au niveau national qu'au niveau Européen. Le projet européen ISER (Integrated Safety for European Road) s'intéresse, entre autres, aux deux-roues : Accidentologie et Sécurité préventive. Dans le même esprit, le projet national RIDER a préconisé un système d'information permettant l'analyse descriptive des accidents de la route afin d'identifier et de caractériser les problèmes. Les données collectées permettront de réaliser des études statistiques plus ou moins complexes.

7.6.1.2 L'infrastructure routière

Bien que la dynamique (ou le comportement) des véhicules deux roues soit fortement impactée par l'interface pneu-chaussée, c'est-à-dire directement liée à l'infrastructure routière, il est évident que la littérature relative à l'infrastructure est très peu exploitée. Les rares travaux de recherche s'y référant ne traitent essentiellement que des problèmes liés à l'adhérence [144, 145, 180], partie prépondérante abordée lors de la reconstruction dynamique des accidents par le biais des coefficients d'adhérence.

Il semble donc que beaucoup de progrès reste à faire en matière d'infrastructure, du fait qu'elle a été conçue initialement pour les voitures de tourisme et semble inappropriée pour les deux roues, principalement en zone urbaine.

Depuis peu, plusieurs actions ont été entreprises en France pour améliorer les aménagements routiers vis à vis des deux roues [181]. Une des premières actions consiste en la mise en place dans chaque Division Départementale de l'Equipement d'un correspondant moto dont l'objectif est de sensibiliser les services aux problèmes spécifiques des motards et de permettre de mieux prendre en compte, dans les nouvelles conceptions routières, les deux roues motorisés.

7.6.1.3 Dynamique de la moto et le comportement du pilote

Dans ce volet, les travaux de recherche se font rares aussi, (1) anciens : dans [28] les auteurs ont étudié le comportement dynamique de la moto (modes instables, maniabilité, etc.), (2) récents : le travail de Chang [182] sur le comportement dynamique de la moto en cas de choc et (3) récents : des études que nous avons initiées [35, 33] sur la dynamique moto et comportement dans les situations précédant la chute. Il est à signaler que la plupart de ces travaux ont pour objectif de proposer des mesures de prévention.

Sur le comportement du pilote, la littérature est assez pauvre, surtout sur les aspects cognitifs et leurs particularités dans la conduite d'un véhicule deux-roues motorisé. Peu

d'ouvrages aborde la problématique liée aux manœuvres d'urgence que le motard va devoir effectuer pour éviter l'accident [177].

L'essentiel des travaux traitent du comportement des conducteurs dans une situation d'urgence. Dans ce cas, il y a deux manœuvres possibles, freiner ou tenter d'éviter la collision, qui peuvent toutes deux s'avérer utiles. Reste que le réflexe majoritaire des motards est le freinage. Ce choix réduit la vitesse d'impact et par conséquent minimise les conséquences du choc. Ce choix nous exige une aide au conducteur afin d'optimiser son freinage, car les conducteurs n'atteignent que rarement les valeurs de décélération maximales permises par leur véhicule. D'où les assistances au freinage d'urgence que l'on voit poindre sur motos et scooters.

7.6.1.4 L'équipement de protection

Les équipementiers ont fait de gros efforts à ce sujet puisque deux normes sont en vigueur pour la protection des membres supérieurs applicables aux genoux. Ces résultats sont le fruit d'approches s'apparentant davantage à des essais. Or, il n'y aura pas de prévention efficace qui ne s'appuie sur une bonne connaissance de l'insécurité.

L'équipement de protection se limite dans la littérature à l'étude du casque. Il est vrai que la tête représente le segment corporel le plus vulnérable mais il ne faudrait pas oublier que certaines autres blessures peuvent également mener à des handicaps graves. Le projet RIDER qui ouvre de nombreuses pistes ne devrait pas passer inaperçu.

7.6.2 Architecture du système d'alertes pour les véhicules deux roues

Forts de nos travaux de modélisation et de conception d'outils pour la formation (simulateur de conduite), nous avons voulu apporter nos compétences dans le domaine de la sécurité préventive (travail réalisé dans le cadre de la thèse de M. Slimi) prenant en compte la plupart des points importants soulevés dans la précédente section. Dans le but de proposer une aide au conducteur, le système de sécurité doit tenir compte de trois points essentiels :

- Acquérir la connaissance sur le comportement des véhicules deux-roues dans les situations dangereuses ou précédant l'accident.
- Prouver la faisabilité des systèmes capables de détecter une situation critique à bord de la moto.
- Concevoir un simulateur à bord du véhicule afin d'avertir le conducteur et/ou activer les systèmes passifs ou actifs de sécurité.

L'unité d'avertissement que l'on s'assigne dans ce travail, a pour but de fournir une information ou une alerte au conducteur, suffisamment en avance, qui prend en considération les trois acteurs véhicule-infrastructure-conducteur (V-I-C), en tenant compte de plusieurs critères : dynamique véhicule (vitesse longitudinale et latérale, angle de roulis, cap, etc.), l'état de l'infrastructure (géométrie de la route, adhérence) et les capacités de réaction du conducteur (adhérence mobilisable, temps de réaction).

La catégorie d'accidents de type perte de contrôle en virage, liée à la dynamique de véhicule ayant pour origine une vitesse excessive à l'approche d'un virage a été notre cheval de bataille. Pour résoudre ce problème, nous avons développé de nouvelles méthodes basées sur le calcul de la vitesse critique et l'angle de roulis limite en courbe.

7.6.3 Analyse de la perte de contrôle d'un véhicule deux roues lors de la prise de virage

Dans cette partie, je ne préciserai pas comment doit-on conduire en virage de façon à avoir une trajectoire optimale ou de sécurité (regard, zone de découverte, point de corde, zone sollicitation, point de sortie, etc.). Par contre, en se basant sur la dynamique moto, comment peut-on extraire des paramètres pertinents, qui nous informeraient sur l'approche d'une situation de risque, et comment peut-on alerter le conducteur, et ceci indépendamment de sa façon de conduire.

Lors de la prise de virage, la plupart des conducteurs expérimentés amorcent les trajectoires avec des vitesses constantes et le finissent par une accélération à la sortie pour reprendre l'équilibre à l'aide de la force centrifuge. Au milieu du virage, lorsqu'il y a équilibre, cela est dû au fait que les deux forces centripète (qui attire la moto vers le sol) et centrifuge (fonction de la vitesse, qui redresse la moto) sont équivalentes. Si la vitesse du véhicule change, ces deux dernières forces dépendent de plusieurs paramètres tels que le roulis, la vitesse, la courbure, l'adhérence mobilisée et la géométrie de la route.

Dans ce qui suit, nous étudierons l'influence de ces paramètres ainsi que la génération de fonctions de risque, en vue de leur intégration dans un système d'alerte pour le conducteur.

7.6.3.1 Angle de roulis désiré : modèles existants

Un angle de roulis assurant une prise de virage en toute sécurité dépend fortement de la géométrie de la route (courbure, pente et dévers), de l'état de la chaussée (adhérence [11] mobilisée, météo, etc.), l'expérience du conducteur et les états dynamiques du véhicule [183], [184].

En négligeant tout paramètre autre que la courbure ρ, l'angle de roulis permettant de garder le véhicule de deux roues en équilibre, sous l'hypothèse d'une vitesse longitudinale constante, est donné par la relation suivante [183], [185] :

$$\phi_{des} = arctan\left(\frac{v_x^2\rho}{g}\right) = arctan\left(\frac{v_x\dot{\psi}}{g}\right) \tag{7.31}$$

Pour rappel : g est l'accélération de la gravité, v_x est la vitesse longitudinale et $\dot{\psi}$ est la vitesse du lacet. Si nous intégrons dans les calculs l'angle du dévers ϕ_d, les auteurs de [183] ont proposé une nouvelle formule plus restrictive que la précédente :

$$|\phi_{des} - \phi_d| < arctan(\mu_{limit}) + arcsin\left(\frac{\mu_{limit}R_p}{l_0\sqrt{1+\mu_{limit}^2}}\right) \tag{7.32}$$

sous quelques hypothèses simplificatrices, cette dernière formule devient :

$$|\phi_{des} - \phi_r| < arctan(\mu_{limit}) \tag{7.33}$$

Où μ_{limit} est l'adhérence maximale disponible en latéral, R_p est le rayon du pneu, l_0 est la distance entre le centre de gravité de la moto et le centre géométrique du pneu. La distance $l_0 + R$ est la hauteur du centre de gravité par rapport à la chaussée (position verticale).

11. L'adhérence ou le coefficient de friction latérale est fonction de (1) la température de la chaussée, (2) la condition ou l'état de la route et (3) géométrie du pneu et la vitesse longitudinale du véhicule, [183].

7.6.3.2 Modèle pour la génération du roulis admissible

L'idée fondatrice de cette approche est basée sur le précédent schéma, à savoir l'équation 7.31, en faisant appel à une expression de vitesse limite en virage (prenant en compte l'adhérence mobilisée par le conducteur) et non pas la vitesse instantanée. Il est à noter aussi que l'angle de roulis donné par 7.32 ou 7.33 est plus restrictif que le premier modèle. Néanmoins, la dynamique du véhicule deux roues et l'ensemble des paramètres géométriques de la route ne sont pas pris en charge par cette approche. Nous avons donc proposé une approche prenant en charge les paramètres pertinents du triplet Véhicule-Infrastructure-Conducteur (VIC), que nous détaillons dans la suite.

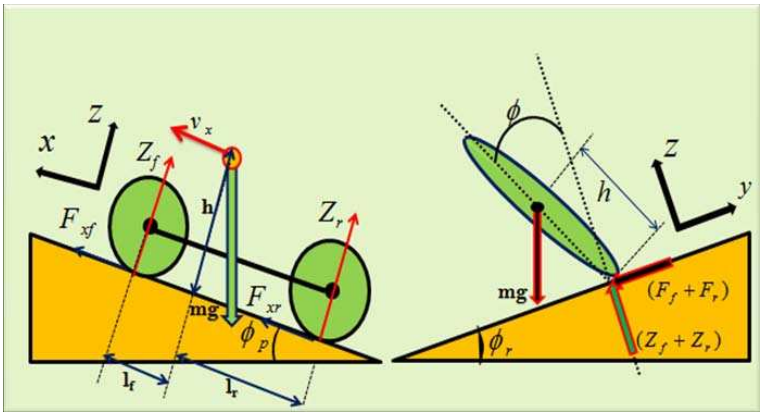

FIGURE 7.26 – *Paramètres géométriques et forces considérées pour le modèle simplifié*

a) **Modèle dynamique de la moto :**

Lors de cette étape, la nécessité d'un modèle, du moins simplifié, d'un véhicule deux roues réside en partie dans le calcul des forces au point de contact pneumatique chaussée et le transfert de charge.

Considérons le modèle dynamique longitudinal simplifié d'un véhicule deux roues, représenté par la figure 7.26. Cette dynamique est décrite par un système d'équations suivant [163] :

$$\begin{cases} M(\dot{v}_x - h\phi\ddot{\psi}) = \underbrace{(F_{xf} + F_{xr})}_{F_{long}} + Mgsin(\phi_p) \\ I_x\ddot{\phi} = Mgh\phi - (F_{yf} + hF_{yr}) \end{cases} \tag{7.34}$$

Où ϕ_p est l'angle de pente de la route, ϕ est l'angle de roulis du véhicule et $F_{long} = (F_{xf} + F_{xr})$ représentent les forces longitudinales agissant respectivement sur les roues avant et arrière ainsi que la composante de la force motrice (suite aux accélérations/décélérations conducteur), [186].

Dans ce modèle sont pris en compte : les forces issues du contact pneu-chaussée, les forces verticales dues au poids et le transfert de charge provoqué par l'accélération longitudinale $\dot{v}_x$.

Le deuxième système d'équation décrit la dynamique latérale :

$$\begin{cases} M(\ddot{y} + \dot{\psi}v_x + h\ddot{\phi}) = \underbrace{(F_{yf} + F_{yr})}_{F_{lat}} - Mgcos(\phi_p)sin(\phi_d) \\ I_z\ddot{\psi} = l_fF_{yf} + l_rF_{yr} \end{cases} \tag{7.35}$$

$\ddot{y}$ est l'accélération latérale, I_x et I_z sont les moments d'inertie respectivement autour des axes x et z. $F_{lat} = (F_{yf} + F_{yr})$ représentent les forces latérales agissant respectivement sur les roues avant et arrière.

A présent, nous allons exprimer les forces (latérales et verticales) au point de contact, nécessaires pour les deux étapes suivantes :

$$\begin{cases} F_{yf} = \dfrac{1}{l_f + l_r}(l_r M\ddot{y} + I_z\ddot{\psi} + l_r Mgsin(\phi_r)) \\ F_{yr} = \dfrac{1}{l_f + l_r}(l_f M\ddot{y} - I_z\ddot{\psi} + l_f Mgsin(\phi_r)) \end{cases} \tag{7.36}$$

Dans le cas d'une vitesse longitudinale variable, l'effet de transfert de charge apparaît lorsqu'il y a freinage ou accélération. Par conséquent, les forces normales sur les deux roues peuvent être obtenues par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{zf} = \dfrac{1}{l_f + l_r}(l_r Mgcos(\phi_d)cos(\phi_p) - hF_{long}) \\ F_{zr} = \dfrac{1}{l_f + l_r}(l_f Mgcos(\phi_d)cos(\phi_p) + hF_{long}) \end{cases} \tag{7.37}$$

b) **Interface pneu-chaussée** :

Le comportement dynamique de ce contact est très complexe et ne peut être linéairisé que sous certaines conditions. Nous pouvons observer divers phénomènes tels que le dérapage et le glissement pur.

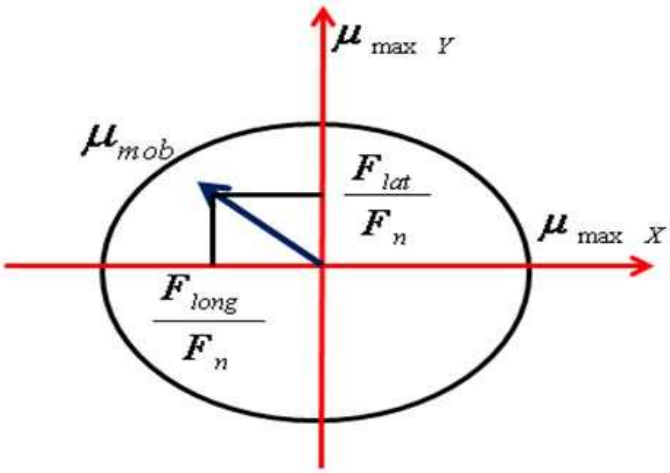

FIGURE 7.27 – *L'ellipse d'adhérence [3]*

Plusieurs modèles existent pour le calcul de l'adhérence mobilisée par l'opérateur. Nous considérons ici le modèle de Coulomb pour obtenir μ_{mob} :

$$\mu_{mob} = \frac{F_t}{F_n} \leq \mu_{max} \tag{7.38}$$

Où F_t est la force transversale, telle que $F_t^2 = F_{lat}^2 + F_{long}^2$, $F_n = F_{zf} + F_{zr}$ est la force normale et μ_{max} l'adhérence maximale disponible. Nous avons donc :

$$\begin{cases} \mu_{mob}^2 & = \frac{F_{lat}^2+F_{long}^2}{F_n^2} = \mu_{lat}^2 + \mu_{long}^2 \\ \text{avec :} & \\ \mu_{lat} & = \frac{F_{lat}}{F_n} \\ \mu_{long} & = \frac{F_{long}}{F_n} \end{cases} \tag{7.39}$$

Les accélérations longitudinale et latérale peuvent être approximées par :

$$\begin{cases} \gamma_{lat} = \ddot{y} = \rho v_x^2 \\ \gamma_{long} = \frac{dv_x}{dt} = v_x \frac{dv_x}{ds} \\ \dot{\psi} = \rho v_x \end{cases} \tag{7.40}$$

A partir des équations 7.36, les dernières équations permettront l'écriture des expressions relatives aux adhérences longitudinale et latérale sont :

$$\begin{cases} \mu_{latf} = \dfrac{\mu_{lat} + \left(\frac{I_z}{l_r M g}\right)\ddot{\psi}}{cos(\phi_p) - \left(\frac{hF_{long}}{l_r M g}\right)} \\ \mu_{latr} = \dfrac{\mu_{lat} - \left(\frac{I_z}{l_f M g}\right)\ddot{\psi}}{cos(\phi_p) + \left(\frac{hF_{long}}{l_r M g}\right)} \end{cases} \tag{7.41}$$

avec :

$$\begin{cases} \mu_{lat} = \frac{\gamma_{lat}}{g} + sin(\phi_d) \\ \mu_{long} = \frac{\gamma_{long}}{g} - sin(\phi_p) \end{cases} \tag{7.42}$$

Ces équations sont approximatives en considérant le théorème des petites perturbations sur les angles de pente et de dévers.

Dans le domaine des vitesses considérées, nous pouvons ignorer le terme $\left(\frac{I_z}{l_f M g}\right) \cdot \ddot{\psi}$ par rapport à μ_{lat}. L'équation 7.41 devient :

$$\begin{cases} \mu_{latf} = \frac{\mu_{lat}}{1-\phi_p-\left(\frac{h \cdot \gamma_{long}}{l_r g}\right)} \\ \mu_{latr} = \frac{\mu_{lat}}{1-\phi_p+\left(\frac{h \cdot \gamma_{long}}{l_r g}\right)} \\ \text{avec :} \\ \mu_{lat} = \frac{\gamma_{lat}}{g} + \phi_d \\ \mu_{long} = \frac{\gamma_{long}}{g} - \phi_p \end{cases} \tag{7.43}$$

La vitesse limite de sécurité, utile pour le calcul du roulis désiré, est fonction de l'adhérence maximale disponible. Dans le cas d'un véhicule deux roues, nous prenons le maximum entre les deux adhérences mobilisées, ainsi :

$$\mu_{max} = max\left(\sqrt{\mu_{latf}^2 + \mu_{longf}^2}, \sqrt{\mu_{latr}^2 + \mu_{longr}^2}\right) \tag{7.44}$$

équivalente à :

$$1 = max\left(\sqrt{\left(\frac{\mu_{latf}}{\mu_{latmax}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{longf}}{\mu_{longmax}}\right)^2}, \sqrt{\left(\frac{\mu_{latr}}{\mu_{latmax}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{longr}}{\mu_{longmax}}\right)^2}\right) \tag{7.45}$$

c) **Comportement du conducteur :**

Le pilote est sans cesse obligé, suivant sa perception sur l'environnement, de définir une vitesse et une position adaptée à la situation actuelle. Dans notre approche, les capacités d'accélération/décélération du conducteur sont prises en compte. Par ailleurs, et pour des raisons de confort et de sécurité, le conducteur ne mobilise pas toute l'adhérence (longitudinale/latérale) disponible. Le conducteur préfère œuvrer dans une ellipse interne correspondant au domaine d'accélération acceptable pas le conducteur et l'ellipse externe correspond aux capacités du couple route-conducteur. Afin de représenter ce comportement, nous définissons deux coefficients adimensionnels, λ_{lat}, λ_{long}, tels que :

$$\mu_{latmax} = \lambda_{lat} \cdot \mu_{max} \quad et \quad \mu_{longmax} = \lambda_{long} \cdot \mu_{max} \tag{7.46}$$

Après développements [33], les expressions de la vitesse limite en virage peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} \phi_p \geq 0 \\ v_x^2 = \frac{g}{\rho}\left\{\left(1 - \frac{h}{l_f}\phi_p\right)\sqrt{1 - \left(\frac{\phi_p}{\lambda_{long}\mu_{max}}\right)^2} \cdot \lambda_{lat} \cdot \mu_{max} - \phi_d\right\} \\ \phi_p < 0 \\ v_x^2 = \frac{g}{\rho}\left\{\left(1 - \frac{h}{l_f}\phi_p\right)\sqrt{1 + \left(\frac{\phi_p}{\lambda_{long}\mu_{max}}\right)^2} \cdot \lambda_{lat} \cdot \mu_{max} - \phi_d\right\} \end{cases} \tag{7.47}$$

Finalement, l'angle de roulis autorisé, en se basant sur l'équation 7.31, est donné par l'expression :

$$\begin{cases} \phi_p \geq 0 \\ \phi = tan^{-1}\left(\left(1 - \frac{h}{l_f}\phi_p\right)\sqrt{1 - \left(\frac{\phi_p}{\lambda_{long}\mu_{max}}\right)^2}\lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_r\right) \\ \phi_p < 0 \\ \phi = tan^{-1}\left(\left(1 - \frac{h}{l_f}\phi_p\right)\sqrt{1 + \left(\frac{\phi_p}{\lambda_{long}\mu_{max}}\right)^2}\lambda_{lat}\mu_{max} - \phi_r\right) \end{cases} \tag{7.48}$$

- Le terme $\left(1 - \frac{h}{l_f}\phi_p\right)$, traduit l'impact du transfert de charge et son implication dans la limitation de l'adhérence latérale mobilisée.
- Le terme $\sqrt{1 - \left(\frac{\phi_p}{\lambda_{long}\mu_{max}}\right)^2}$ représente l'adhérence longitudinale mobilisée, nécessaire pour garder un roulis constant.

7.6.3.3 Analyse de l'impact des trois paramètres

a) **Influence de la géométrie de la route : Angle de dévers**

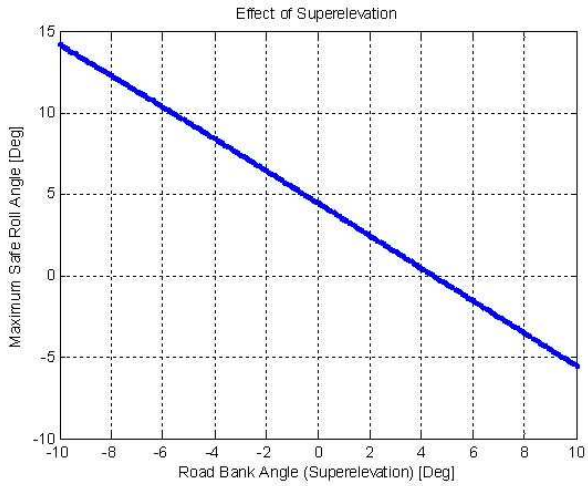

FIGURE 7.28 – *Impact de l'angle de dévers sur le profil du roulis admissible en virage*

Le but du dévers est la compensation d'une partie de l'accélération latérale. Dans la figure 7.28, nous avons simulé un virage à gauche d'une courbure $\rho > 0$ avec, naturellement, un angle de dévers négatif $\phi_d < 0$. Nous pouvons constater sur la figure que plus le dévers est cohérent avec la courbure de la route plus l'angle de roulis admissible est important et vice versa. Exemple, pour un angle de dévers de $-10°$, l'angle de roulis est 3 fois plus grand que celui autorisé pour un dévers nul.

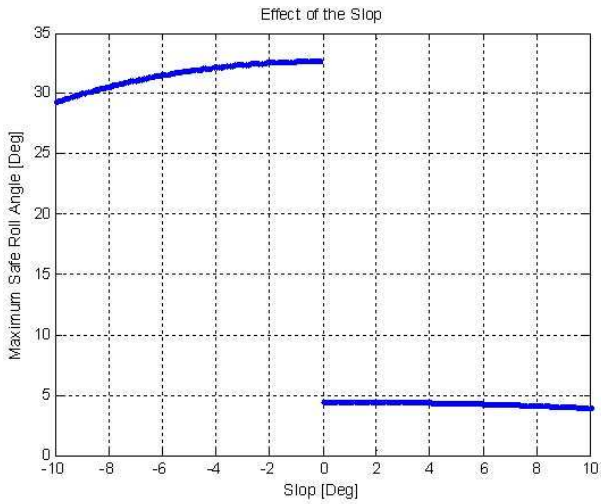

FIGURE 7.29 – *Impact de l'angle de pente sur le profil du roulis admissible en virage*

b) **Influence de la géométrie de la route : Angle de la pente**

Ce paramètre intervient efficacement dans le calcul de l'angle du roulis admissible pour mobiliser une partie de l'adhérence maximale disponible et aussi dans la dynamique longitudinale du véhicule (transfert de charge). Exemple, lorsque le conducteur freine alors que la pente de la route est négative (lorsque la route monte), la masse du véhicule fait décélérer le véhicule (du fait de la présence de la pente). Ainsi pour une adhérence longitudinale donnée le véhicule décélère plus que si la pente est nulle. Cependant, la figure 7.29 montre que l'effet de l'angle de la pente n'est pas très contrai-

gnant sur l'angle du roulis admissible en prise de virage (dans les mêmes les conditions de simulation que précédemment).

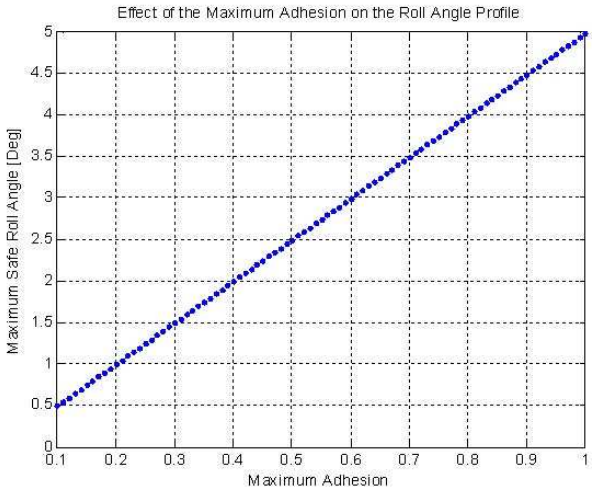

FIGURE 7.30 – *Impact de l'adhérence mobilisable*

c) **Impact de l'adhérence mobilisable :**
Dans l'expression des conditions limites (équation 7.48), l'angle de roulis admissible est fonction (*atan*) directe de l'adhérence maximale μ_{max}. Connaissant les caractéristiques de la fonction *tangente*, nous pouvons facilement comprendre l'effet de l'argument de la fonction sur le roulis admissible, figure 7.30.

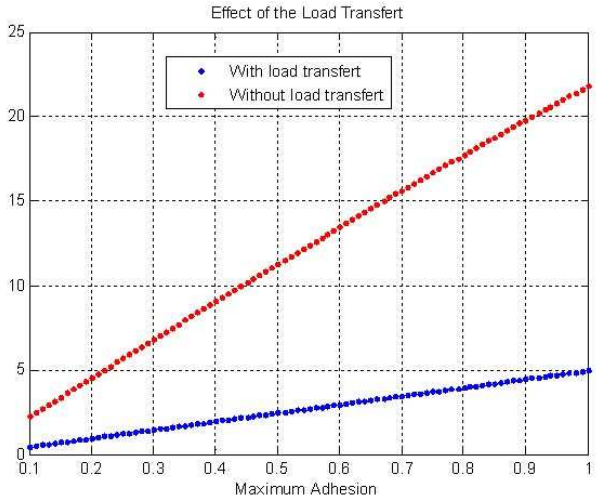

FIGURE 7.31 – *Impact du transfert de charge*

d) **Impact du transfert de charge** La figure 7.31 illustre l'effet du transfert de charge sur l'angle du roulis admissible en fonction de l'adhérence maximale. En utilisant les mêmes conditions qu'aux simulations précédentes, mais avec un conducteur ayant des capacités en longitudinal (mobilise le maximum de l'adhérence disponible), $\lambda_{long} = 1$. L'angle de roulis admissible est plus faible lorsque le transfert de charge est pris en compte. En pratique, l'effet est très faible du fait de la constance de la vitesse longitudinale (transfert de charge nul) en prise de virage, sauf en sortie ou une accélération est nécessaire afin de redresser la moto.

7.6.3.4 Modèles de la vitesse limite en prise de virage

En se basant sur le raisonnement précédent (synthèse du roulis admissible), nous présentons dans cette partie quelques modèles pour le calcul de la vitesse maximum autorisée pour un véhicule de deux roues en prise de virage. Les trois acteurs Véhicule-Infrastructure-Conducteur sont pris en compte pour la synthèse des différents modèles. Le résultat de ces modèles alimentera directement le système d'alerte afin de rendre compte au conducteur de la situation actuelle.

Dans la suite, je présenterai deux modèles utilisés pour les voitures de tourisme que nous avons adaptés pour les motos ainsi qu'un nouveau modèle fonction de paramètres intrinsèques du véhicule (masse, inertie, etc.). Pour plus de détails voir [35].

a) **Modèle de vitesse simple et impact du rayon de courbure :**

En négligeant tout paramètre autre que la courbure ρ, la vitesse maximale permettant de garder le véhicule de deux roues en équilibre est donnée par la relation suivante [183] :

$$V_{x_{max}} = \sqrt{\frac{g\mu_{lat}}{\rho}} \tag{7.49}$$

Cette relation simple est utilisée traditionnellement pour les véhicules de tourisme afin de calculer la vitesse autorisée en virage. Cependant, cette relation ne fait apparaître aucun autre élément tel que : l'adhérence (route sèche ou mouillée, le résultat est le même !), la géométrie de la route (pente et dévers), etc.

En gardant les mêmes hypothèses, nous souhaitons démontrer, dans la suite, l'influence du rayon de courbure sur le calcul de cette vitesse limite.

Considérons un point matériel P de masse M tournant autour de l'axe z à vitesse ω. Il s'agit ici d'un point, donc l'influence des moments est ignorée. La trajectoire choisie est définie par le rayon de courbure $\rho(t) = \frac{1}{R(t)}$ (supposé continu et dérivable) ainsi que sa dérivée première $\dot{\rho}(t) = \frac{-\dot{R(t)}}{R(t)^2}$.

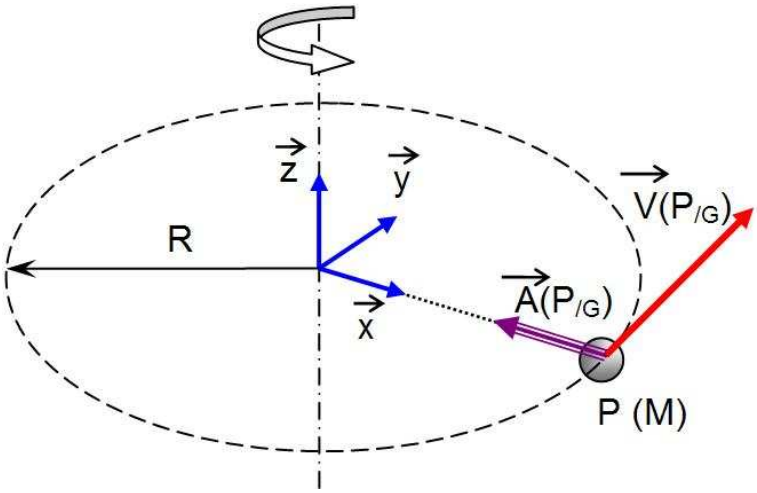

FIGURE 7.32 – *Paramètres cinématiques d'un objet en mouvement circulaire*

Dans ces conditions, nous avons :

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \omega\vec{y}\,;\ \frac{d\vec{y}}{dt} = -\omega\vec{x} \text{ et } \frac{d\vec{z}}{dt} = 0 \tag{7.50}$$

Les coordonnées du point P sont données par :

$$\vec{OP} = R(t)\vec{x} = \frac{\vec{x}}{\rho(t)} \tag{7.51}$$

Nous pouvons exprimer le mouvement, la vitesse puis l'accélération, par les dérivées successives, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d\vec{OP}}{dt} = \vec{V}_{P/O} = \frac{d\vec{R(t)}}{dt}\vec{x} + R(t)\omega\vec{y} = \frac{-\dot{\rho}(t)}{\rho(t)^2}\vec{x} + \frac{1}{\rho(t)}\omega\vec{y} \\ \frac{d^2\vec{OP}}{dt^2} = \vec{A}_{P/O} = \frac{d\vec{V}_{P/O}}{dt} = \left(\frac{d^2R(t)}{dt^2} - R(t)\omega^2\right)\vec{x} + \left(2\frac{dR(t)}{dt}\omega + R(t)\dot{\omega}\right)\vec{y} \end{cases} \tag{7.52}$$

Cette dernière équation peut être réécrite en fonction de la vitesse linéaire (tangentielle), en remplaçant ω par $\frac{V(t)}{R(t)}$. L'équation de l'accélération (7.52), possède deux termes importants, à savoir :

- Le premier terme obtenu par projection sur $\vec{x}$ représente l'accélération centrifuge : $\left(\frac{d^2R(t)}{dt^2} - \frac{V^2}{R(t)}\right)$. On constate que dans le cas d'une route de type circulaire (rayon constant) ou d'une clotoïde (première dérivée du rayon constant) l'accélération (ou la force) centrifuge ne dépend que de la vitesse et de la valeur instantanée du rayon. Par ailleurs, le rayon peut impacter la valeur de la vitesse limite en début de virage où les deux premières dérivées ne sont pas constantes (le rayon évolue de $R \to \infty$ vers $R \to$ constante et inversement en sortie de virage).
- Le deuxième terme obtenu par projection sur $\vec{y}$ représente l'accélération tangentielle : $\left(2\frac{dR(t)}{dt}\omega + R(t)\dot{\omega}\right)$. L'impact de ce terme sur la définition d'un sous ou sur-virage est en cours d'étude.

La vitesse limite en prise de virage, où le rayon de courbure est forcément variable, peut être reformulée comme suit :

$$A_{lat} = -\frac{d^2R(t)}{dt^2} + \frac{V^2}{R(t)} = g\mu_{lat} \Rightarrow V_{x_{max}} = \sqrt{\frac{\ddot{R}(t) + g\mu_{lat}}{\rho(t)}} \tag{7.53}$$

avec :

$$\ddot{R}(t) = \frac{2\rho\dot{\rho}^2 - \rho^2\ddot{\rho}}{\rho^4} \tag{7.54}$$

b) **Adaptation du modèle NHTSA :**

Aux Etats-Unis, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) calcule la vitesse limite des voitures en virage en se basant sur la formule suivante [187] :

$$V_{x_{max}} = \sqrt{\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\phi_d + \mu_{lat}}{1 - \phi_d \cdot \mu_{lat}}} \tag{7.55}$$

Contrairement à la précédente formule, l'équation 7.55 prend en compte l'angle de dévers de la route ainsi que l'adhérence latérale. Cependant, cette formule linéarisée

ne semble pas tenir compte du roulis du véhicule de deux roues qui peut atteindre 30° dans certains cas et par conséquent, absorber une grande partie de l'accélération latérale (force centrifuge).

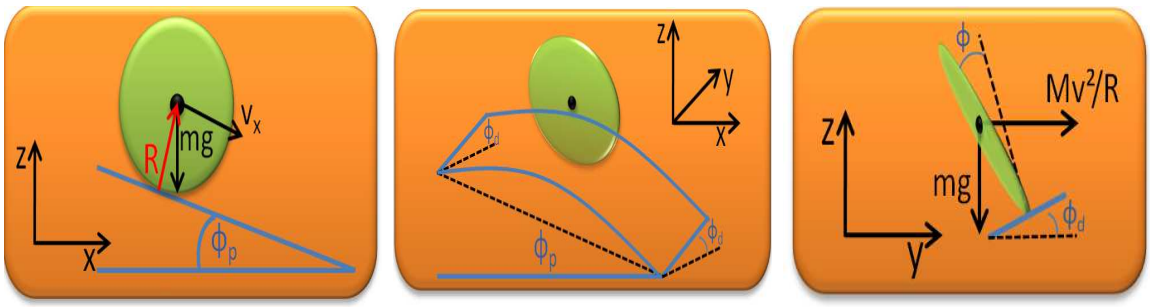

FIGURE 7.33 – *Différents angles : pente, dévers et roulis*

Sur les figures 7.33, R représente la force de réaction de la route sur le véhicule. ϕ, ϕ_d et ϕ_p sont respectivement les angles de roulis, de dévers et de la pente.
Si nous considérons que ϕ et ϕ_d sont nuls et par projection des équations d'équilibre sur les axes y et z, nous obtenons :

$$\{ \; R \cdot sin(\alpha + \phi_d) = M\rho V_x^2 R \cdot cos(\alpha + \phi_d) = Mg \tag{7.56}$$

où M est la masse du corps en mouvement. α est l'angle de friction latérale (adhérence), $tan(\alpha) = \mu_{lat}$ est appelée coefficient de friction statique.
Afin de simplifier la force de réaction R, nous divisons les deux équations du système (7.56), ce qui donne :

$$tan(\alpha + \phi_d) = \frac{\rho V_x^2}{g} \Rightarrow V_x = \sqrt{\frac{g \cdot tan(\alpha + \phi_d)}{\rho}} \tag{7.57}$$

Par ailleurs, nous savons aussi que :

$$tan(\alpha + \phi_d) = \frac{tan(\phi_d) + tan(\alpha)}{1 - tan(\phi_d)tan(\alpha)} \tag{7.58}$$

Après calcul et en remplaçant $tan(\alpha)$ par μ_{lat}, l'équation (7.57) devient, sous une forme non-linéaire :

$$V_{x_{max}} = \sqrt{\frac{g}{\rho} \cdot \frac{tan(\phi_d) + \mu_{lat}}{1 - tan(\phi_d) \cdot \mu_{lat}}} \tag{7.59}$$

Cette équation est équivalente à l'équation (7.55), si nous approximons linéairement $tan(\phi_d)$ par ϕ_d.
Dans ce qui suit, nous considérons que les angles de pente de roulis ne sont pas nuls (cas d'un véhicule deux roues). Par le remplacement dans l'équation (7.57) l'angle α par l'angle $\alpha + \phi$ (les deux angles sont dans le même plan), le système d'équations (7.56) s'écrit :

$$\begin{cases} F_x = R \cdot sin(\phi_p)cos(\alpha + \phi + \phi_d) \Rightarrow \text{Force motrice} \\ R \cdot cos(\phi_p)sin(\alpha + \phi + \phi_d) = M\rho V_x^2 \\ R \cdot cos(\phi_p)cos(\alpha + \phi + \phi_d) = Mg \end{cases} \tag{7.60}$$

Donc, nous pouvons exprimer la vitesse limite par :

$$V_{x_{max}} = \sqrt{\frac{g}{\rho} \cdot \frac{tan(\phi_d) + \frac{tan(\phi)+\mu_{lat}}{1-tan(\phi)\mu_{lat}}}{1 - tan(\phi_d) \cdot \frac{tan(\phi)+\mu_{lat}}{1-tan(\phi)\mu_{lat}}}} \tag{7.61}$$

Nous constatons que l'angle de pente n'a pas d'effet sur le calcul de la vitesse limite V_x (résultat cohérent avec le calcul du roulis admissible), alors qu'elle module la force motrice sur l'axe x. Aussi, les deux angles de dévers et de roulis ont le même impact, à savoir que plus l'un ou l'autre augmente plus la vitesse autorisée V_x est importante.

c) **Nouveau modèle pour la génération du profil de vitesse de sécurité :**

Le modèle de vitesse limite développé dans [35] est une forme plus évoluée du modèle représenté par l'equation 7.47, à la seule différence du modèle dynamique utilisé, plus complexe que le premier. Ce modèle dynamique est composé de deux corps M_f et M_r (avant et arrière). Les centres de gravité de chacun de ces deux corps sont distancés, respectivement de l_f et l_r du centre de gravité de l'ensemble.

Après avoir suivi une synthèse identique à celle utilisée précédemment, la vitesse limite est donnée par $V_{x_{max}} = min(v_1, v_2)$, telles que :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{-\Delta_1+\Delta_3\sqrt{1-\Delta_4^2}}{\Delta_2} \\ v_2 = \frac{-\Delta_1-\Delta_3\sqrt{1-\Delta_4^2}}{\Delta_2} \end{cases} \tag{7.62}$$

avec :

$$\begin{cases} \Delta_1 = K_\gamma \phi \\ \Delta_2 = K_\alpha(l_2 g \cos(\phi_p)\cos(\phi_r)\dot{\psi} - v_y) \\ \Delta_3 = \frac{M_f+M_r}{l_1+l_2}(l_1 g \cos(\phi_p)\cos(\phi_d) - ha_x)\mu_{latmax} \\ \Delta_4 = \frac{M_f+M_r}{l_1+l_2}(l_1 g \cos(\phi_p)\cos(\phi_d) - ha_x)\mu_{longmax} \end{cases} \tag{7.63}$$

Où K_α est la rigidité de dérive latérale (équation 7.4) et K_γ est la rigidité du carrossage.

Ce modèle de vitesse limite est fonction de paramètres intrinsèques du couple véhicule-conducteur (masse et inertie), extrinsèques (géométrie de la route, adhérence disponible) et du comportement du conducteur (capacité d'accélération, adhérence mobilisée, transfert de charge).

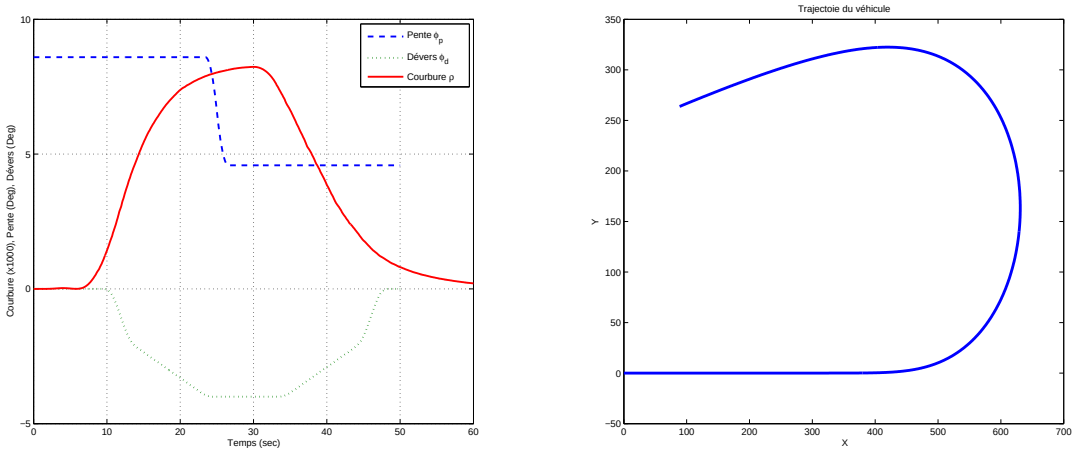

FIGURE 7.34 – *Trajectoire du véhicule et ses caractéristiques*

7.6.3.5 Résultats de simulations

Par abstraction à l'impact des paramètres sur le calcul des vitesses limites, nous avons simulé les différents modèles afin de comparer les résultats et ce, sous les même conditions de simulation. Ces conditions : pente, dévers et courbure sont illustrées par la figure 7.34. Le jeu de paramètres restant (adhérences, l'angle de roulis, etc.) est fourni par le modèle dynamique du véhicule. Ce dernier a été soumis à des entrées en vitesses angulaires des roues et couple conducteur assurant l'équilibre tout au long d'une trajectoire de type *U-turn*. Seul le dernier modèle, utilisé pour la génération du profil de vitesse, s'est basé sur un modèle dynamique moto assez complet. Les deux premiers schémas ont utilisé soit une approximation grossière de la force centrifuge, soit un modèle dynamique simple d'un solide en virage.

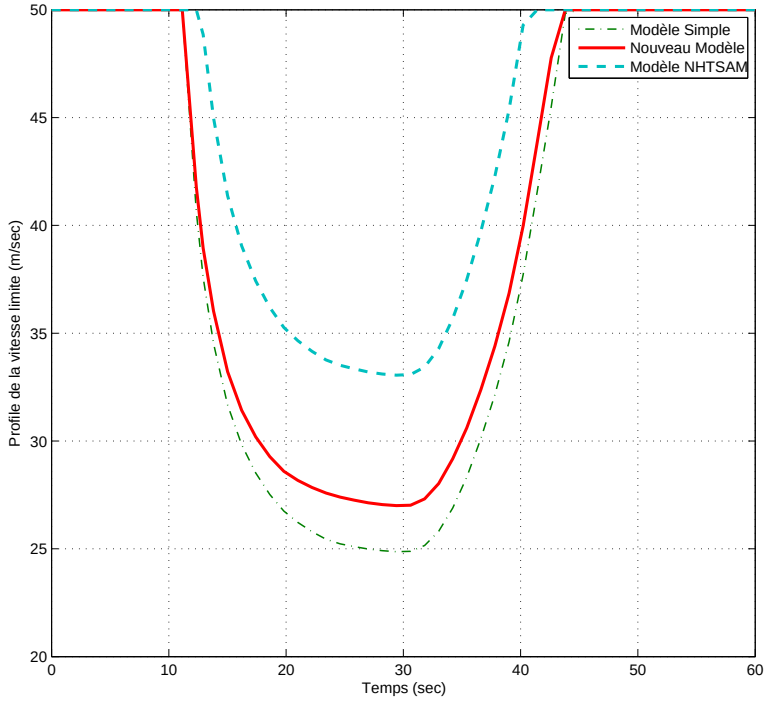

FIGURE 7.35 – *Profils des vitesses limites*

Les trois modèles présentés précédemment, nous délivrent des profils de vitesses limites assez distincts et présentant parfois des décalages importants (20 Km/h). Nous pouvons remarquer que le modèle proposé NHTSA (adapté aux véhicules deux roues) offre plus de possibilités de vitesse, en virage, comparé aux modèles restants. Le nouveau modèle présente plusieurs avantages telles que la prise en compte des paramètres intrinsèques du véhicule (masse, inerties, etc.) mais doit être reconsidéré afin d'étudier l'impact réel de l'angle de roulis sur le calcul du profil de vitesse limite.

Il est à noter que la véracité de ces modèles ne pourra être validée pratiquement que par des essais frôlant les cas limites.

7.7 CONCLUSION

Le conducteur est l'élément central de toute opération de conduite, puisque il constitue une *commande naturelle* prenant en compte plusieurs facteurs importants. Une conduite efficace sur un véhicule de deux roues nécessite tout d'abord de l'expérience. Cette expérience se traduit par une concentration lors de la conduite, une vision bien orientée (surtout en virage), dosage des freins, une attention particulière à l'environnement dans lequel on évolue, etc. Le manquement à cette liste non-exhaustive est généralement la conséquence d'accidents dramatiques comparés à ceux provoqués sur des véhicules de tourisme (le rapport de mortalité de 21). Pour cela, les utilisateurs des véhicules deux roues sont jugés parmi les vulnérables de la route.

L'une des différences entre une voiture et une moto réside dans le déséquilibre permanent sur les deux roues. Le rôle du conducteur est donc essentiel afin de garder cet

équilibre lors de la conduite, du fait d'un rapport massique favorable au motard (contrairement à la voiture). Aussi, l'action de l'environnement sur les pneus est un facteur important, sachant que 80% des réactions de la moto sont issues de ce contact pneu chaussée.

La multitude de ces paramètres affectant le comportement des véhicules deux roues, qui reste un engin très "sensible" à grande vitesse, mérite d'être étudié (modélisé), ce que nous avons réalisé. Les difficultés des modèles dynamiques que nous avons testés ou proposés se basent sur la nature de l'application dédiée (sécurité préventive, simulation de conduite, contrôle commande) ainsi que sur la pertinence des mouvements requis.

Par ailleurs, la modélisation dynamique des véhicules deux roues nous a permis d'initier des travaux sur les profils de conduite en sécurité. Cette action a pour but le développement d'un système d'alerte pour les conducteurs afin de les aider à anticiper mieux les situations de danger, [44]. Les systèmes de sécurité deviennent plus que nécessaires du fait du manque d'un équipement de sécurité efficace ou mal/moins utilisé. D'où la nécessité, aussi, d'outils de formation tels que les simulateurs de conduite, objet du prochain chapitre.

Les situations de risque peuvent être provoquées par la perte de contrôle, entre autre en virage (cas le plus répandu). Dans la présence de très peu de travaux de recherche, nous avons souhaité contribuer à la résolution de problématiques connexes. A cette fin, nous avons proposé plusieurs *fonctions de risque* pouvant détecter et alerter sur des situations de dépassement de vitesse limite ou roulis admissible. Ces paramètres, jugés très pertinents, seront testés sur un véhicule instrumenté et sur des circuits bien modélisés (cartographie précise). Les modèles que nous avons développé peuvent être améliorés en prenant en compte autres facteurs tels que une modélisation fine, d'un coté, du comportement conducteur (l'élément central) ; temps de réaction et la corrélation entre le système de vision et le dosage en couple, et de l'autre, de l'intégration du système de motorisation, etc.

D'autres travaux de recherche, liés à ce type de véhicules, que je mène en ce moment n'ont pas été abordés :

- Automatisation d'un véhicule deux roues (sans conducteur). Ce travail a été lancé dans le cadre d'une thèse lancée en septembre 2009.
- Techniques de stabilité d'un deux roues.

La suite de ces travaux passera nécessairement par l'implantation du système d'alertes sur un scooter, disponible au laboratoire et à moitié instrumenté. Néanmoins, il sera utile de se pencher sur les problématiques liées à l'observation d'états dynamiques de ce type de véhicule. Les modèles sont loin d'être simples et/ou linéaires pour procéder à des applications rapides. Les états dynamiques, essentiels à l'analyse de situations de risque, ne sont pas accessibles à la mesure (efforts pneumatiques ou adhérence, accélération latérale, perturbations aérodynamiques externes, couples du conducteur, etc.). Un premier travail, [32], a été amorcé afin d'estimer le couple du conducteur exercé sur le guidon du simulateur moto (détaillé dans le chapitre suivant), par le biais d'observateurs linéaires non robustes. L'objectif principal était de pouvoir conduire un véhicule deux-roues virtuel dans un environnement visuel synthétisé. Cependant, dans le cas réel, étant donné que le véhicule deux-roues est un système non-linéaire, des observateurs de type mode glissant, ou les techniques basées sur la logique floue, sont très envisageables.

Simulateurs et Simulation de Conduite : Contributions et Réalisations

8

Sommaire

8.1 Introduction . . . 161
8.2 Architectures des plates-formes de restitution de mouvement . . . 163
8.2.1 Eléments constituant un simulateur de conduite . . . 163
8.2.2 Cabine ou cockpit . . . 164
8.2.3 Système visuel . . . 164
8.2.4 Classification d'architectures robotiques des simulateurs de conduite . . . 167
8.3 Première partie : Simulateur de conduite SIM^2 pour la conduite automobile . . . 171
8.3.1 Architecture des mini-simulateurs . . . 172
8.3.2 Modèle dynamique de la plate-forme dite "longi" . . . 174
8.3.3 Modèle dynamique de la plate-forme dite "Lacet" . . . 177
8.3.4 Algorithmes de Restitution de Mouvements, "ARM" . . . 181
8.3.5 Résultats pratiques et Expérimentations . . . 188
8.4 Deuxième partie : Simulateur de conduite deux roues . . . 192
8.4.1 Aspects de conception et de mécanique . . . 195
8.4.2 Aspects de modélisation et identification . . . 197
8.4.3 Adaptation des ARM aux simulateurs deux-roues . . . 205
8.4.4 Tests expérimentaux en boucle ouverte . . . 206
8.4.5 Changement de voie et prise de virage . . . 207
8.4.6 Discussion . . . 209
8.5 Conclusions . . . 210

Pendant la conduite d'un véhicule automobile ou deux-roues, les sources d'informations qui permettent au conducteur de suivre une piste donnée et de contrôler son véhicule sont variées. L'objectif de la simulation de conduite, est donc de fournir une illusion de mouvement propre, en cohérence avec les informations réelles, sur un véhicule

virtuel à l'exception des organes de commande (guidon, accélérateur, frein, etc.) Cette illusion est un phénomène complexe qui met en jeu les capteurs proprioceptifs de l'être humain et notamment des systèmes visuel, kinesthésiques et vestibulaire.

Concevoir un simulateur est un compromis entre la fidélité de la reproduction perceptive et le coût global de l'architecture proposée. Si la conception de simulateurs automobiles est un champ de recherche très actif depuis de nombreuses années, la simulation de conduite moto reste balbutiante avec peu de prototypes dans le monde. La question de l'immersion est encore plus complexe pour un deux-roues, du fait notamment, des questions d'équilibre.

Dans ce dernier chapitre, nous allons discuter les différents aspects pris en compte dans la conception de simulateurs dédiés à la conduite automobile ou deux-roues. Nous discuterons aussi les objectfis attendus, l'état actuel des travaux ainsi que les perspectives.

8.1 Introduction

Un simulateur de conduite est un outil qui reproduit dans un contexte artificiel une situation de conduite d'un véhicule automobile. Le nombre des utilisateurs ayant recours à ce type d'outil ne cesse d'augmenter. Cependant, selon le besoin et la discipline, leurs exigences en termes de performance et de réalisme de simulation sont différentes. Ainsi, l'objectif premier des constructeurs automobiles est de tester l'interaction véhicule-conducteur afin d'évaluer l'impact sur la conduite de nouveaux dispositifs intégrés au véhicule et la réaction de ces dispositifs aux différentes manœuvres du conducteur. En effet, aujourd'hui, les innovations technologiques modifient de manière considérable la conduite sur véhicule réel. Les nouveaux systèmes d'assistance à la conduite, tel l'ESP, les systèmes d'information, tel le GPS, enfin, les systèmes de X by Wire en font une tâche très différente de ce qu'elle était quelques années auparavant. Aussi, avant d'intégrer un système sur un véhicule réel, les constructeurs automobiles sont contraints d'effectuer des tests pour s'assurer de l'apport positif de ce système sur la conduite. Il est donc important de disposer de systèmes de prototypage rapide afin, d'une part, d'optimiser le temps de développement, d'autre part, de prévoir et de corriger les problèmes qui peuvent survenir pendant la conduite sur véhicule réel. Les simulateurs de conduite automobile sont les outils idéaux pour réaliser ce type de tests.

Bien que cet objectif ne puisse être parfaitement réalisé, les constructeurs essayent de restituer fidèlement sur simulateur l'environnement auquel le conducteur est confronté dans le réel. En effet, leur objectif est de lui permettre d'éprouver la plupart des sensations perçues sur un véhicule réel. Aussi, la cabine du simulateur est généralement basée sur le cockpit d'un véhicule réel. Des dispositifs à retour haptique sont couplés à certains organes de pilotage, tels que le volant et les pédaliers (frein, embrayage), pour procurer au conducteur une stimulation haptique semblable à celle qu'il éprouverait dans un véhicule réel. Un ou plusieurs écrans restituent la scène virtuelle, couvrant le plus souvent un large champ de la vision du conducteur. Un retour auditif simulant le trafic, le régime du moteur, le bruit du vent, ainsi que d'autres indices laissant apprécier la vitesse du véhicule, sont restitués en 3D. Les plates-formes mobiles sont considérées comme l'un des éléments les plus importants susceptible d'augmenter le réalisme de la simulation. En effet, elles sont destinées à répliquer, aussi fidèlement que le permet l'espace de travail de la plate-forme, les effets inertiels du véhicule simulé. Elles permettent donc aux sujets de mieux percevoir la dynamique du véhicule (effets inertiels) et, par conséquent, d'effectuer un meilleur contrôle de ce dernier. Les plates-formes les plus sophistiquées telles que nous les retrouvons sur le simulateur de conduite NADS [188, 189], ULTIMATE [190] ou encore celui de Toyota (le dernier conçu dans le genre, figure 8.1), sont des systèmes à 8 degrés de liberté. Ils sont constitués d'une plate-forme parallèle 6 axes (Gough-Stewart) montée sur une plate-forme cartésienne X-Y. Ce type de plates-formes est souvent d'un coût très élevé et son large espace de travail est conçu pour augmenter la bande passante des accélérations restituées. De telles plates-formes sont généralement accessibles seulement aux constructeurs automobiles ou aux grands organismes de recherche.

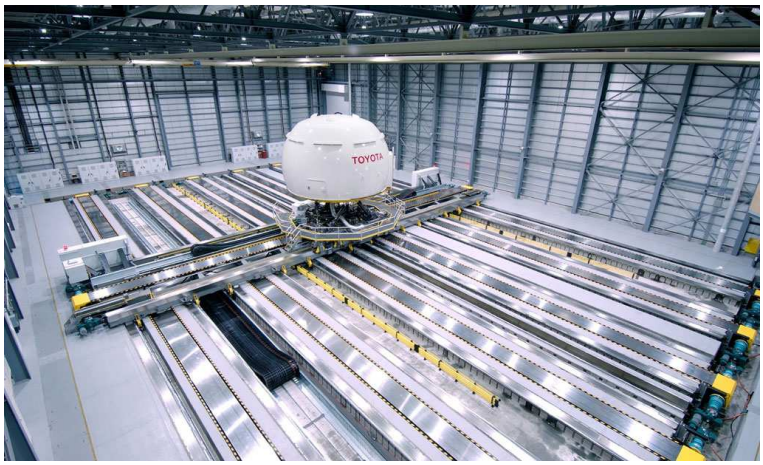

FIGURE 8.1 – *Simulateur de Toyota - Centre Technique de Toyota à Susono City, Japon*

Pour les formateurs en conduite automobile, les simulateurs sont des outils destinés essentiellement à permettre aux conducteurs d'acquérir les réflexes élémentaires de la conduite. Les formateurs considèrent donc que le réalisme de la conduite est un élément important pour l'apprentissage de la conduite, mais le coût d'acquisition de ce type d'outil est une contrainte qu'ils prennent également en considération. Ils sont donc souvent intéressés par des simulateurs à bas coût qui offrent un environnement virtuel suffisant pour entraîner le conducteur aux manœuvres de base de la conduite. Un autre aspect essentiel pour les formateurs est de pouvoir établir différents scénarios de trafic plausibles, afin de mettre le conducteur face à des situations de conduite jugées primordiales pour l'apprentissage. Le formateur étant souvent considéré comme un utilisateur, il est jugé essentiel que le logiciel de simulation des scénarios ou de trafic puisse être assez souple à l'utilisation et permette de créer aisément les scénarios nécessaires à la formation.

Les chercheurs qui mènent des études sur le comportement du conducteur s'intéressent de très près aux simulateurs de conduite. Les expérimentations approfondies menées pour l'étude comportementale du conducteur en situation réelle sont souvent très lourdes à réaliser car elles se déroulent généralement dans un environnement très peu contrôlé. En effet, les conditions climatiques et la complexité du trafic sont telles que l'interaction du conducteur avec son environnement est pratiquement impossible à reproduire. Par ailleurs, l'étude de certaines situations de conduite dangereuses, telle que la conduite dans le brouillard, est irréalisable à cause des risques auxquels les sujets sont susceptibles d'être exposés. Ainsi, pour des raisons de reproductibilité, de coût et surtout, de sécurité, les simulateurs de conduite semblent être incontournables pour certaines études comportementales du conducteur. Toutefois, les résultats des expérimentations menées sur simulateurs ne peuvent être valides que si le comportement du conducteur sur simulateur est très proche de celui qu'il montre en situation réelle. Or, le comportement induit par les simulateurs face à certaines conditions routières n'est pas toujours le même que celui suscité dans une situation de conduite réelle. De plus, des tâches de conduite, telles que celles liées au maintien de trajectoires ou encore celles liées à la conduite en file sont beaucoup plus difficiles à réaliser sur simulateur, même dans des conditions normales de circulation. Ces lacunes qui caractérisent plus ou moins la majorité des simulateurs de conduite sont principalement dues aux limites inhérentes aux simulateurs, en termes de restitutions visuelle et haptique. Pour que les résultats obtenus sur simulateur soient transférables au réel, il est donc impératif, pour ce type d'étude, que le simulateur procure

au conducteur les stimuli nécessaires pour que le comportement que l'on souhaite étudier soit le plus proche possible du réel.

La suite du chapitre sera composée de deux grandes parties dédiées aux plates-formes que nous avons développées, à savoir deux simulateurs de conduite auto et moto. Une section précédant ces deux parties introduira succinctement les simulateurs de conduite et les éléments constitutifs.

8.2 Architectures des plates-formes de restitution de mouvement

8.2.1 Eléments constituant un simulateur de conduite

La conception d'un simulateur est un vrai défi pluridisciplinaire, car chaque simulateur est un prototype en lui même et il n'existe aucune norme de réalisation. Son succès ne peut être atteint qu'avec une collaboration entre les différentes compétences, du concepteur jusqu'à l'utilisateur final. On peut subdiviser un simulateur de conduite en plusieurs sous-systèmes devant fonctionner de façon synchrone pour créer un environnement de conduite proche du véhicule réel (Figure 8.2). Il est important que ces sous-systèmes soient synchronisés avec un minimum de retard entre l'action du conducteur et la réaction du simulateur [191]. Le non respect de cette contrainte induit une altération de l'illusion ainsi qu'une difficulté de contrôle du simulateur.

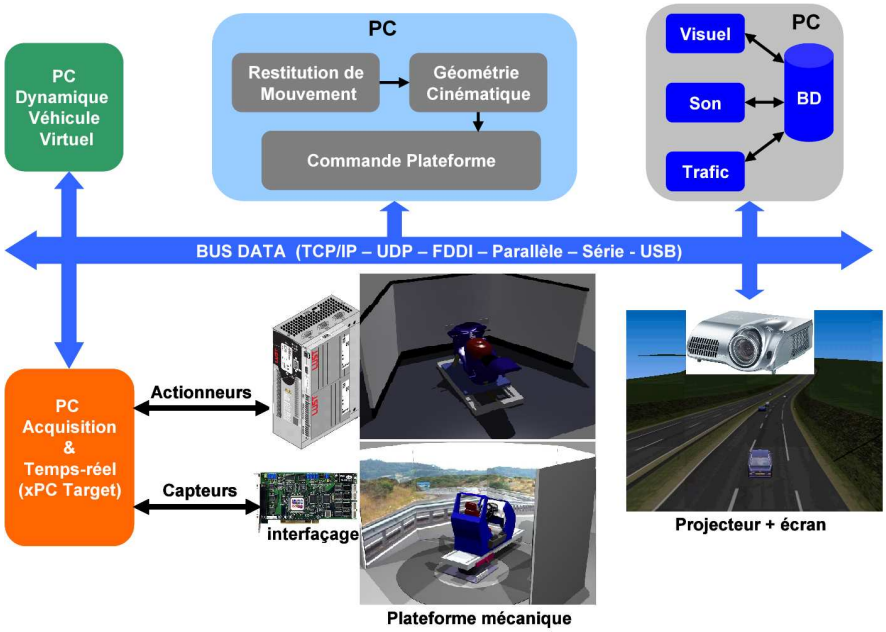

Figure 8.2 – *Architecture simplifiée d'un simulateur de conduite*

Lors de la phase de conception de la plate-forme, une attention doit être donnée à tous les sous-systèmes avec une question centrale : "qu'a-t-on besoin de reproduire comme mouvement ?" en fonction des tests envisagés et de l'application à laquelle le simulateur est destiné. Par exemple, pour la conduite en ligne droite, une table vibrante est largement suffisante. Pour d'autres situations, une plate-forme mobile plus complexe peut être nécessaire.

Les applications de simulation de conduite peuvent être semblables au niveau de leurs architectures et les éléments constitutifs.

8.2.2 Cabine ou cockpit

Certaines cabines sont de vrais prototypes ou des versions réduites d'un châssis du véhicule réel. Elles accueillent le conducteur et disposent d'une instrumentation complète pour transmettre les actions vers le calculateur de la dynamique du "véhicule virtuel". Ainsi, l'accélérateur, l'embrayage, les freins et la boite de vitesse sont dotés de capteurs et les voyants du tableau de bord sont activés. Afin d'augmenter le réalisme de la simulation, les cabines sont équipées d'un volant/guidon à retour actif et/ou d'un siège motorisé pour reproduire les différentes vibrations ressenties lors d'une conduite réelle (irrégularités de la chaussée, vibrations de châssis du véhicule, moteur au ralenti, etc.)

8.2.3 Système visuel

Ce système est constitué d'un générateur graphique 3D plus un ensemble de dispositifs de reproduction visuelle. Généralement, les images sont projetées sur un ou plusieurs écrans de projection, afin d'assurer une vision frontale, latérale, voire arrière si nécessaire.

En fait, conduire est une tâche principalement visuelle et il est donc évident que cette information doit être extrêmement soignée. La qualité d'une image est mesurée par ses propriétés énergétiques (luminosité, contraste, résolution, couleur) [192], ses caractéristiques spatiales (champs de vision, profondeur) [193, 194, 195] et temporelles (délais de transport et taux de rafraîchissement) [196, 197, 198, 199]. En conséquence, produire une scène visuelle avec un grand réalisme dépend des efforts apportés pour satisfaire ces facteurs.

FIGURE 8.3 – *Mode immersif (a) Casque HMD (b) Représentation d'une partie du conducteur*

Lors des deux dernières décennies, des dispositifs d'immersion ont été fortement utilisés dans les applications de réalité virtuelle. Il s'agit du casque virtuel (Head Mounted Display). Néanmoins, cette technique est rarement utilisée dans les simulateurs actuels. En effet, ces systèmes créent des problèmes oculaires [200], de fatigue et de confort à cause d'une mauvaise résolution (coût élevé des casques haute résolution). De plus, le système virtuel doit reproduire l'intérieur du véhicule et parfois quelques parties du corps du conducteur (Figure 8.3), ce qui demande d'importantes capacités de calcul. Toutefois, cette technique semble bien adaptée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues, puisqu'à l'origine, les motards sont tenus de porter des casques de protection. Ainsi, certaines marques de tels dispositifs embarquent des capteurs permettant de déterminer la

position et l'orientation de la tête du conducteur dans l'espace, ce qui constitue un surplus à ne pas négliger.

8.2.3.1 Système sonore

Souvent considéré comme une priorité secondaire, le système sonore permet d'optimiser le réalisme de la simulation de conduite. Les principales caractéristiques de cet élément sont le nombre, la qualité et la localisation des haut-parleurs, ainsi que la diversité des sons produits. En effet, la bande fréquentielle du son dominant dans un véhicule est d'environ 20-500 Hz induite essentiellement par le régime moteur [201, 202, 203]. Certains bruits des pneumatiques ou de la chaussée ont des composantes principales en hautes fréquences. Par conséquent, le système sonore doit couvrir quelques milliers de hertz. Une méthode efficace de mise en place du son est d'utiliser une banque de données sonores, les échantillons sont mixés en temps-réel pour obtenir une bonne illusion [204].

8.2.3.2 Trafic et scénario

L'interactivité de la scène visuelle est un élément important pour un réalisme maximum de la simulation de conduite. Les différents objets visuels (véhicules, piétons, etc.) doivent être dotés d'une certaine intelligence afin que les situations de conduite simulées soient suffisamment "réalistes" et acceptées comme telles par les conducteurs. Le trafic est l'une des clés de l'établissement d'un protocole d'expérimentation réussi.

8.2.3.3 Dynamique du véhicule virtuel

Le mouvement de la plate-forme d'un simulateur de conduite est défini à partir d'un modèle informatique qui décrit la dynamique du véhicule virtuel. Ce dernier permet de calculer les états du véhicule en réponse aux diverses consignes du conducteur.

La complexité du modèle dynamique dépend de l'architecture mécanique du simulateur, et également du type d'études à mener. Si le simulateur est utilisé pour le développement d'applications véhicule, le modèle doit être dynamiquement riche, par exemple une formulation avancée des phénomènes des pneumatiques doit être considérée. Sinon, une représentation capable de retranscrire le système de motorisation et le mode latéral du guidage est suffisante.

8.2.3.4 Restitution du mouvement

Le système de restitution du mouvement a pour tâche de reproduire une partie des effets inertiels présents dans une situation de conduite réelle afin d'atteindre un niveau de simulation acceptable. Ces forces varient d'un véhicule à un autre en fonction du comportement du conducteur et de l'état de la chaussée.

Un autre facteur déterminant est la bande passante des accélérations. Les accélérations linéaires sont dominantes entre 0-1Hz avec un pic pour l'accélération verticale de l'ordre de 2-3Hz dû à la suspension. Les accélérations angulaires "tangage et roulis" ont essentiellement des composantes à hautes fréquences contrairement au lacet. Cependant, les mouvements angulaires de roulis et de tangage dans une voiture sont mécaniquement limités à environ $\pm 6°$, [205].

La conception d'un système, capable de simuler ces caractéristiques fréquentielles, est obtenue grâce à deux modules différents : l'un pour le rendu des accélérations hautes

fréquences (HF) et le second pour des accélérations à basses fréquences (BF). Pour les composantes HF, une table vibratoire est un moyen efficace pour reproduire les vitesses linéaires du véhicule et les irrégularités de la chaussée. La qualité du rendu des composantes BF dépend grandement des types de manipulations aux quels le simulateur est destiné. S'il s'agit d'une étude de comportement dans un trafic urbain normal, certains spécialistes pensent que pour des manœuvres en dessous de 0.3g, un simulateur à base fixe est suffisant. Par contre, dans une situation de conduite dangereuse ou critique, la sensation des forces inertielles est un élément central, et par conséquent, une plate-forme mobile est nécessaire.

Dans ce dernier cas de figure, le grand défi est d'accomplir les mouvements de la plate-forme dans l'espace de travail du simulateur. Les contraintes géométriques et cinématiques doivent être respectées en utilisant des algorithmes de commande communément connus sous le nom d'Algorithme de Restitution de Mouvement (ARM). Ces algorithmes se fondent sur une simple séparation fréquentielle des diverses accélérations à restituer par le biais de deux stratégies. La première utilise le mouvement longitudinal du simulateur où l'accélération transitoire est restituée par un simple mouvement linéaire. La deuxième consiste à incliner la cabine de la plate-forme pour exploiter une composante du vecteur de la gravité afin de reproduire la composante continue de l'accélération. Toutefois, un facteur d'échelle est généralement utilisé pour réduire le besoin en mouvements. Des études ont montré que le plus faible facteur d'échelle à utiliser est de 0.35, un certain nombre de simulateurs avec mouvement utilisent des facteurs d'échelle de 0.5 ou plus [189].

En conclusion, lors de la conception d'un système de rendu du mouvement, il est important de prendre en considération les tests et les manipulations ciblés.

8.2.3.5 Géométrie, cinématique et commande bas-niveau

Ce module est une étape intermédiaire entre la génération des trajectoires de consigne par les algorithmes de restitution de mouvement et l'actionnement de la plate-forme. Suivant l'architecture mécanique de la plate-forme, il est nécessaire de transformer les trajectoires de référence générées dans un espace de coordonnées définit vers un espace de coordonnées des actionneurs (espace articulaire). Par exemple, dans le cas des plates-formes parallèles, il faut prendre en compte la géométrie et la cinématique inverse ainsi que les couplages entre les différents axes dans le développement d'une stratégie de commande donnée.

L'asservissement bas-niveau a pour tâche d'assurer le bon suivi des trajectoires de référence. Cependant, le but premier de la simulation de conduite est de créer une bonne illusion de conduite, donc le contrôleur synthétisé ne doit pas être trop gourmand en termes de temps de calcul. Des stratégies simples favorisant la compensation des retards inertiels avec le minimum de précision ont montré leur efficacité. Aujourd'hui, les servo-contrôleurs de puissance sont dotés d'une intelligence très suffisante basée sur un asservissement axe par axe avec plusieurs boucles de contrôle imbriquées (position, vitesse et couple) pour de meilleures performances de suivi et de précision.

8.2.3.6 Plate-forme mécanique et système d'actionnement

Afin d'atteindre les performances escomptées lors de l'établissement du cahier des charges, il est nécessaire de bien choisir l'architecture de la plate-forme (nombre de DDL)

et le système d'entraînement correspondant. D'autres exigences interviennent de manières quasi-systématiques telles que la flexibilité de la mécanique de l'architecture, de meilleures performances dynamiques (démarrage, freinage), la fiabilité et la sécurité de fonctionnement. Les progrès de l'informatique industrielle et de l'électronique de puissance réunis, répondant aux exigences suscitées, ont favorisé l'utilisation des machines électriques au dépend des machines hydrauliques. En effet, les actionneurs hydrauliques possèdent une grande caractéristique de force, la densité d'énergie est presque 100 fois plus importante que celle d'une machine électrique idéale. Mais ce facteur ne doit pas à lui seul dicter le choix de la solution. La souplesse d'emploi de l'énergie électrique, la rapidité et les vitesses élevées offrent un rapport qualité/prix favorable aux actionneurs électriques. Enfin, le problème d'asservissement se pose en des termes beaucoup plus simples avec des entraînements électriques. Les actionneurs hydrauliques présentent de fortes non-linéarités marquées d'hystérésis. Ce fait est important et se ressent sur les performances de précision de l'installation.

8.2.3.7 Communication, acquisition et contraintes temps-réels

La synchronisation de tous les modules décrits auparavant est un élément clé d'un développement réussi. Les problèmes de retards sont à l'origine d'une perte de contrôlabilité du simulateur ou d'un rendu de mouvement médiocre. La téléinformatique propose des stratégies de plus en plus robustes et faciles à implémenter. Pour l'acquisition des données issues des capteurs, plusieurs solutions sont envisageables comme celles fondées sur des cartes à microcontrôleurs, FPGA ou plus à la mode des DSP (Digital Signal Processor) capables de calculer des modèles mathématiques complexes en "temps-réel". La communication entre les calculateurs et les capteurs se fait, généralement, soit par des voies analogiques (DAQ, etc.), ou via des bus de terrain numériques dotés d'un gestionnaire de tâches très avancé (CAN, Interbus, Profibus, etc.). Quelques simulateurs profitent des avancées de la technologie optique qui propose des bus optiques à des débits très élevés. Enfin, entre le modèle dynamique du véhicule virtuel et le système de restitution visuelle, une simple communication réseau en TCP/IP ou UDP peut être suffisante.

8.2.4 Classification d'architectures robotiques des simulateurs de conduite

Dans cette partie, il s'agit de définir et dresser un petit état de l'art et un comparatif des différentes architectures robotiques utilisées comme plates-formes de restitution de mouvement pour les simulateurs de conduite automobile. Nous distinguerons donc les solutions dites à base fixe, dans lesquelles aucun mouvement réel n'est restitué à l'opérateur et les solutions dites actives. Ces dernières consistent en des structures mécaniques actionnées (i.e. motorisées.) Les aspects qui concernent la nature et les caractéristiques des actionneurs utilisés ne sont pas abordés, seules les caractéristiques cinématiques et dynamiques sont mises en exergue.

Dans la bibliographie, on compte une centaine de simulateurs à travers le monde. Qu'elles soient académiques, industrielles ou commerciales, plusieurs institutions se sont lancées dans la construction de leur propre prototype pour différents objectifs. Généralement, les simulateurs sont classés suivant leur architecture mécanique, qui à elle seule, permet d'avoir une idée sur la complexité et les objectifs suivis.

8.2.4.1 Plates-formes à base fixe

Les plates-formes à base fixe ne possèdent aucun mouvement mécanique. Les indices inertiels et autres effets dynamiques sont absents et par conséquent, aucune technique de restitution de mouvement n'est employée. La sensation du mouvement est induite uniquement par la vection provoquée par le retour visuel. Ces simulateurs se composent d'une cabine instrumentée et sont parfois dotés, en plus de la projection visuelle, d'un système de reproduction auditif et de modalités haptiques (retour d'effort sur le volant, siège vibrant, etc.) qui permettent de créer un environnement de conduite suffisamment immersif (Figure 8.4).

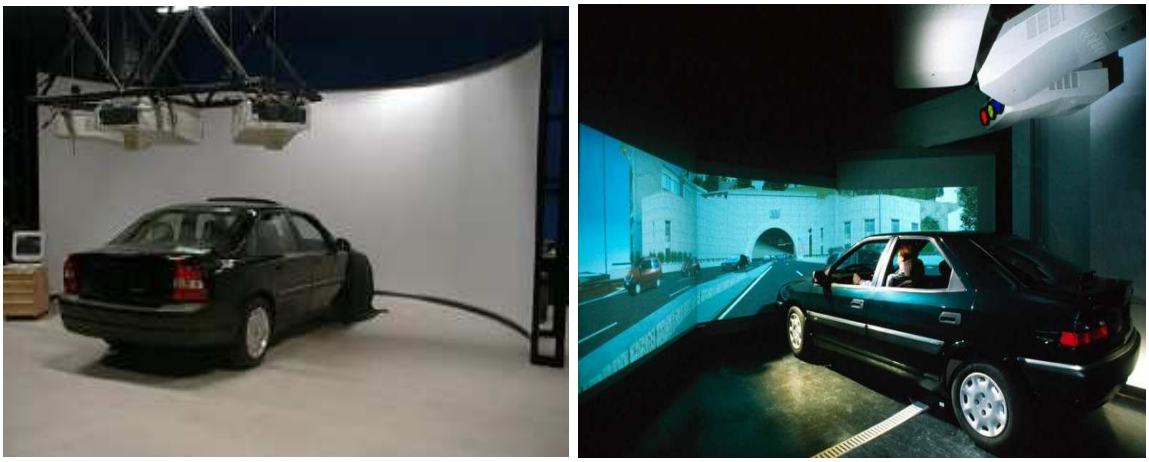

FIGURE 8.4 – *Simulateurs à base fixe : (a) Simulateur Volvo - Suède [4] (b) Simulateur à base fixe de l'INRETS Arcueil - France [5]*

Généralement, ce type de simulateurs est *orienté facteurs humains* et utilisé pour des études portant sur l'aspect physique et mental de la conduite ou aux aspects liés à la perception visuelle. Parmi ces études, on retrouve principalement les problématiques liées à la somnolence, la prise de médicaments ou d'autres substances chimiques nocives (drogues, stupéfiants, antidépresseurs, etc.). On trouve également, des applications liées à l'étude de l'infrastructure routière, au contrôle de trafic, aux systèmes véhicule-route intelligents et à l'identification des situations dues au hasard.

8.2.4.2 Plates-formes à structure série

Dans cette configuration, la cabine est portée par une structure mécanique constituée d'une mise en série d'articulations, architecture très utilisée dans le monde industriel pour effectuer des tâches automatisées. L'avantage principal est un espace de travail conséquent permettant pour quelques manœuvres (par exemple un changement de voie) la reproduction du mouvement à l'échelle réelle. La simplicité de la commande et de la technologie d'articulation utilisée font de cette plate-forme un choix attractif bien adapté aux études comportementales nécessitant des accélérations transitoires importantes comme dans le cas du freinage d'urgence. Cependant, le grand inconvénient est la rigidité décroissant avec la multiplication des axes de rotations, puisque les actionneurs sont portés par les articulations précédentes ce qui diminue la précision de l'effecteur. De plus, les performances dynamiques se dégradent en présence d'une charge importante et notamment pour des vitesses élevées.

Ce concept série fut adopté par plusieurs constructeurs automobiles pour la réalisation de simulateurs maisons. Parmi eux, celui de VTI 3DDL développé par l'Institut National Suédois de Recherche en Transport Routier à LinköPing (Figure 8.5). Le simulateur peut rendre un grand mouvement latéral avec roulis et tangage, le tout augmenté d'une table vibratoire pour la simulation de mouvements à hautes fréquences. Le système visuel couvre un champ de vision de $120° \times 30°$ avec une résolution de 625×1040 pixels par canal. Le délai de communication est de 20ms [194].

FIGURE 8.5 – *Simulateur à structure série de VTI - Suède*

8.2.4.3 Plates-formes à structure parallèle

Ces plates-formes sont constituées de chaînes cinématiques fermées dont l'organe terminal portant la cabine est supporté par plusieurs actionneurs [206]. L'architecture la plus répandue est l'Hexapode 6DDL désignée souvent par ses inventeurs *Gough* et *Stewart* en 1965 [207] (Figure 8.6). Elle présente plusieurs avantages par rapport à la plate-forme série :

- Possibilité d'embarquer des charges très importantes. Cette caractéristique a longtemps été mise à profit pour les simulateurs de vol où il s'agit d'embarquer une version réelle ou réduite d'un cockpit d'avion.

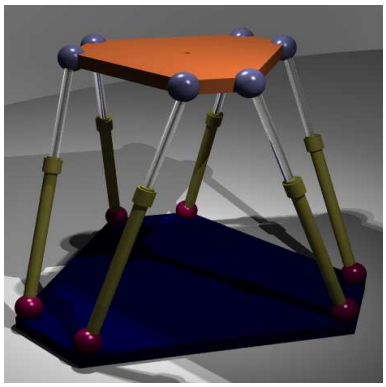

FIGURE 8.6 – *Plate-forme parallèle 6DDL type Gough-Stewart (Image Wikipédia)*

- Haute précision. En effet, la distribution parallèle de la géométrie de la mécanique rend les mouvements moins sensibles aux erreurs de mesure.

– Une grande rigidité du fait que les moteurs d'actionnement sont montés séparément des différentes articulations.
– Une dynamique riche qui offre des couples importants à des vitesses de fonctionnement considérables.

Cependant, les inconvénients majeurs de ce type de structure sont :
– Un espace de déplacement très réduit par rapport à celui offert par la structure série.
– Vu le couplage entre les différents axes du mouvement, l'espace de travail résultant se voit en diminution.
– Une conception mécanique complexe nécessitant une technologie de liaisons délicate.
– Une commande difficile à mettre en œuvre en raison du comportement hautement non-linéaire et surtout la présence de singularités qui demande une attention plus particulière.

Néanmoins, cette architecture mécanique s'est imposée comme une référence pour les mécanismes de restitution de mouvements. Elle était adoptée comme un standard de conception pour les simulateurs de vol et souvent utilisée pour les simulateurs de conduite automobile. La liste des simulateurs ayant privilégié cette technologie est large, ne sont illustrés ici que deux exemples, figure 8.7.

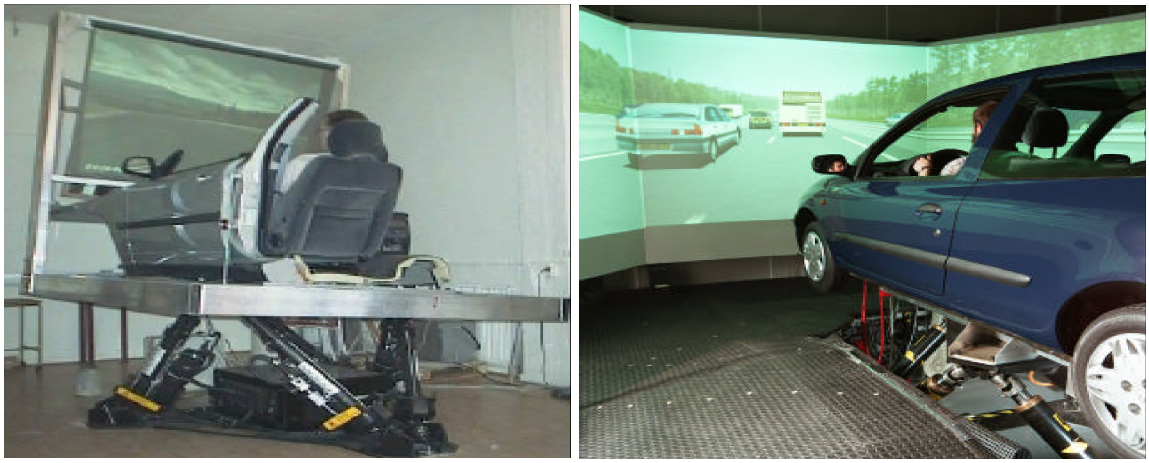

FIGURE 8.7 – *Simulateurs à structure parallèle : (a) Simulateur à plate-forme parallèle de l'université de Chalmers - Suède, (b) Simulateur dynamique de Renault - France*

8.2.4.4 Plates-formes à structure hybride

Pour ces structures, il s'agit de combiner les avantages des deux précédentes architectures. Moyennant diverses astuces techniques, les structures hybrides présentent des chaînes cinématiques ouvertes et fermées complexes et imbriquées. Cependant, certaines solutions, comme celle consistant à porter une plate-forme parallèle sur une table XY, semblent devenir un standard dans le domaine de la simulation de conduite, figure 8.8. De cette façon, on peut s'offrir un généreux espace de travail avec une puissante dynamique.

Figure 8.8 – *Simulateurs à structure hybride : (a) Architecture hybride du simulateur ULTIMATE de Renault - France, (b) Simulateur NADS - Iowa, USA*

8.2.4.5 Simulateurs Low-Cost

L'utilisation des simulateurs de conduite se voit de plus en plus généralisée et adoptée par diverses institutions publiques et privées. Cependant, si le coût d'une formation en avion et la sécurité des passagers autorisent l'investissement dans des simulateurs à coûts très élevés, rien ne justifie qu'il en soit de même pour proposer un outil de formation et d'études psychophysiques. De plus, la complexité d'un simulateur ne reflète en aucun cas sa fidélité à restituer tous les mouvements. Pour cette raison, il était intéressant de proposer des solutions ciblées à base de plates-formes mobiles à bas coût destinées principalement aux écoles de formation, établissements hospitaliers et autres utilisateurs.

Dans ce cadre, deux mini-simulateurs à bas coût ont été construits. Fruits d'une collaboration entre l'équipe MSIS de l'INRETS et l'équipe Réalité Virtuelle du laboratoire IBISC de l'Université d'Evry-Val d'Essonne, ils se présentent comme deux simulateurs de conduite auto et moto respectivement à 2 et 3 DDL. La description détaillée des deux plates-formes est l'objet du reste du présent chapitre.

8.3 Première partie : Simulateur de conduite SIM^2 pour la conduite automobile

Dans cette section, nous aborderons la description de l'architecture matérielle et informatique (figure 8.9) du mini-simulateur, les algorithmes de restitution de mouvements implémentés et les aspects liés à la mise en œuvre ainsi que la validation. Les objectifs et performances visés ainsi que les choix technologiques et l'architecture logicielle utilisés pour atteindre ces objectifs, seront également présentés. Afin de dimensionner le système de restitution de mouvement de façon à satisfaire les performances et les objectifs désirés, nous avons écrit un modèle dynamique de la plate-forme suivi par des simulations dynamiques du modèle qui servira de base pour la synthèse de lois de commande (ou plutôt génération de trajectoire) pour la restitution de mouvements.

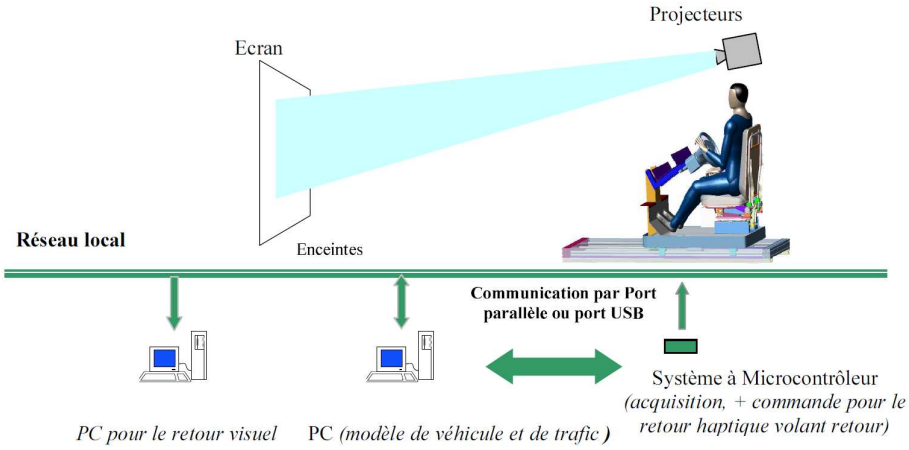

FIGURE 8.9 – *Architecture logicielle du mini-simulateur*

8.3.1 Architecture des mini-simulateurs

Il est évident que la restitution des effets inertiels (accélérations, etc.) sur un simulateur de conduite, rend la conduite plus réaliste que sur un simulateur à base fixe. Toutefois, la restitution de toutes les gammes d'accélérations (freinage d'urgence de l'ordre de -0.9 g par exemple) sur simulateur de conduite demeure impossible en raison de limites technologiques. Du fait de cette impossibilité, on provoque chez le conducteur une illusion des effets inertiels au moyen d'une plate-forme mobile animée par les techniques de restitution de mouvements (évoquées plus en détails plus loin). La fidélité des illusions que l'on produit grâce à ces techniques dépend fortement de l'architecture, des caractéristiques dynamiques, et de l'espace de travail de la plate-forme utilisée.

Concevoir un simulateur est un compromis entre la fidélité que celui-ci est capable de réaliser d'un point de vue perceptif et les coûts que certaines solutions de réalisation peuvent atteindre. Généralement, l'intégration d'une plate-forme mobile dans un simulateur est l'un des facteurs essentiels dans l'augmentation des coûts de réalisation. Toutefois, même si des expérimentations ont montré l'amélioration des performances de conduite sur simulateur en présence d'une plate-forme mobile, on ignore dans quelle mesure celle-ci contribue à cette amélioration, notamment dans les situations de conduite normale. On ignore également l'effet inertiel suffisant pour que le conducteur ait un meilleur contrôle de son véhicule. Dans la suite de cette partie nous allons donc présenter la plate-forme mobile que nous avons conçue pour un simulateur de conduite dont l'objectif est l'étude de situations de conduite "usuelles" (i.e. hors des situations de perte d'adhérence ou de freinage brutal). Nous nous concentrons sur la situation de conduite la plus fréquente qui est la situation de conduite en file [17, 22, 45]. Par la suite, nous évoquerons l'importance du mouvement lacet dans la diminution du "*mal du simulateur*" et présentons la nouvelle architecture. Notre objectif n'est pas de restituer les accélérations de manière physiquement réaliste mais d'étudier l'effet inertiel minimal à partir duquel le sujet extrait l'information qui lui est utile pour achever sa tâche de conduite de façon comparable à une situation de conduite réelle. Dans un premier temps, nous pensions qu'un mini-simulateur à deux degrés de liberté (mouvement longitudinale et tilt du siège) et un retour d'effort volant seraient suffisants. Cette plate-forme permet d'animer la cabine du simulateur par un mouvement longitudinal, d'une part, et par un faible mouvement de tangage du siège du conducteur ou par un faible mouvement d'inclinaison du dossier de ce siège. D'autre part,

le mouvement de translation est réalisé au moyen d'un rail motorisé autorisant un débattement de ± 60cm, tandis que le petit mouvement de tangage est réalisé au moyen d'un moteur capable d'incliner le siège autour d'un axe de rotation situé au bas du dossier du siège autorisant des inclinaisons de ± 4° (figure 8.10). La plate-forme est conçue de façon à être rigide et à pouvoir supporter les brusques variations de l'accélération (détails dans la sous-section suivante). Ce prototype a été financé d'une part par une action spécifique de la Direction Scientifique de l'INRETS, et d'autre part par le laboratoire IBISC dans le cadre d'un Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'Université d'Evry Val d'Essonne.

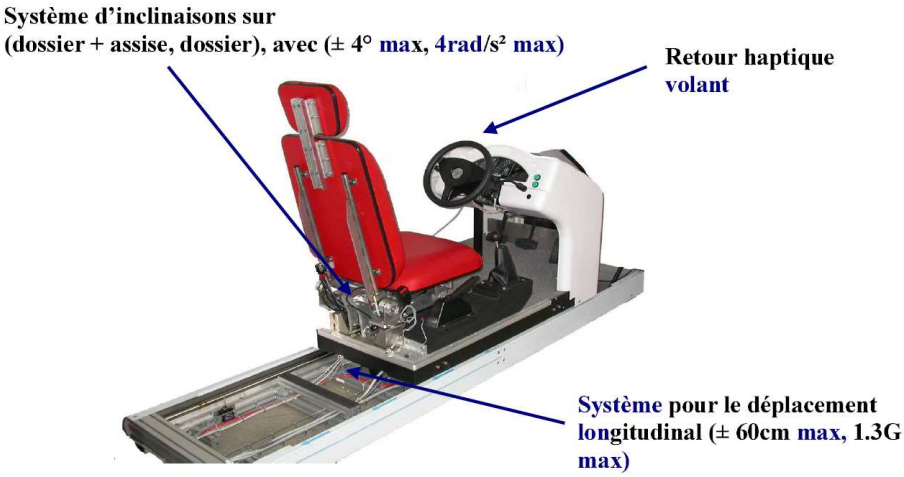

FIGURE 8.10 – *SIM^2 Plate-forme mobile à deux degrés de liberté*

Dans le cadre du projet VIGISIM, l'étude de la somnolence excessive par privation de sommeil sur la vigilance lors de la conduite, la conception d'un simulateur qualifié (figure 8.11) d'une part quant à ses capacités à mettre en évidence les altérations comportementales du conducteur, d'autre part quant à son coût, suffisamment économique pour être déployé sur le territoire, est un enjeu pour la réduction de l'accidentologie routière. Il a été question dans un premier temps de définir les spécifications minimales requises pour un tel outil, de concevoir un prototype prenant en compte les problèmes liés à l'immersion de sujets dans un environnement virtuel et notamment les phénomènes dits de "*mal du simulateur*" (impact direct du mouvement lacet), [43, 42]. Dans un deuxième temps, une validation de l'outil devra être effectuée par comparaison de situations simulées et de situations naturelles. La section 8.3.3 sera consacrée à ce prototype.

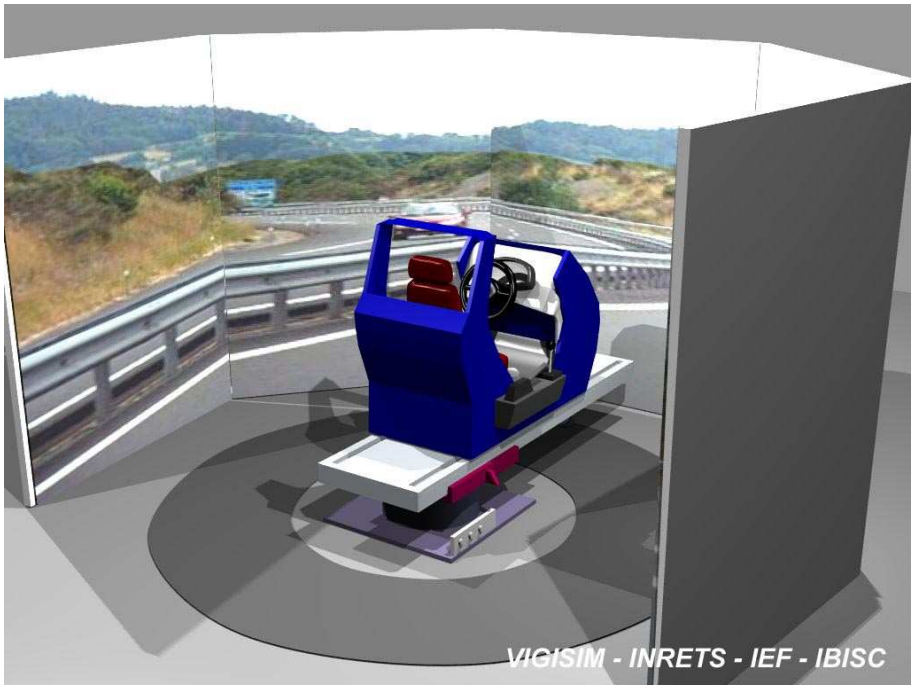

FIGURE 8.11 – *Plate-forme Lacet à deux degrés de liberté*

8.3.2 Modèle dynamique de la plate-forme dite "longi"

L'ensemble du système est considéré comme deux sous-systèmes indépendants liés mécaniquement : le siège conducteur et la plate-forme de mouvement longitudinal. Chaque système est commandé par un seul actionneur et un dispositif de réduction approprié. Le mouvement de la plate-forme se traduit selon une direction (avant et arrière) qui correspond à l'accélération ou la décélération du conducteur. Une bonne conception et un dimensionnement adéquat ont permis, d'une part, l'obtention d'un modèle dynamique linéaire et d'autre part, d'atteindre les exigences en termes d'accélérations, couple délivré, vitesse de rotation, etc.

8.3.2.1 Equation du mouvement longitudinal

La base de la pale-forme supporte la cabine qui elle-même est composée du siège, du châssis du véhicule et du conducteur. Comparée à la masse totale du plateau en mouvement, l'inertie induite par le mouvement de rotation du siège est négligée du fait de la faible vitesse de rotation ainsi que de la faible amplitude du mouvement. Le mouvement linéaire de l'ensemble est réalisé grâce à un mécanisme de transmission par vis à billes-écrou entraîné par un actionneur à courant continu.

Afin de modéliser la dynamique du système longitudinal, nous écrivons tout d'abord les équations de l'actionneur électrique. L'équation est donnée par :

$$u_1 - e_1 = R_1 i + L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{8.1}$$

Où, u_1 : est la tension d'induit du moteur en Volts. e_1 : est la tension générée par la force contre-électromotrice en Volts. R_1, L_1 : sont respectivement l'inductance en Henry et la résistance en Ohm de l'induit du moteur et i_1 : est le courant en Ampères.

L'équation qui décrit la mécanique entraînant la translation de la cabine est comme suit :

$$T_{a1} = J_{a1}\frac{d\omega_{a1}}{dt} + f_{a1}\omega_{a1} + \frac{T_{l1}}{N_1} \tag{8.2}$$

Où, les indices a et l désignent respectivement les variables liées à l'actionneur et les variables liées à la charge, T est le couple (N.m). J : est le moment d'inertie (kg.m^2). f : est le frottement visqueux (N.m.sec/rad). ω_{a1} : est la vitesse de rotation du rotor (rad/sec) et N_1 : le facteur de réduction.

Nous savons aussi que les paramètres du moteur sont liés par les relations suivantes :

$$T_{a1} = k_{t1}i_1 \quad \text{et} \quad e_1 = k_{e1}\omega_{a1} \tag{8.3}$$

Où, k_{t1} et k_{e1} : sont des constantes (respectivement de courant et de vitesse) liées au moteur.

On dispose de deux composantes : le mécanisme de transmission de mouvement écrou/vis à bille et l'ensemble de la cabine. La cabine est considérée comme une masse qui coulisse en translation sur un rail lorsque celle-ci est soumise à une force externe que l'on note F_x. La masse totale animée en translation que l'on note M, est constituée de deux masses distinctes : la masse de la cabine que l'on note m_c et la masse estimée du conducteur que l'on note m_t, nous avons donc $M = m_c + m_t$. Lorsque la plate-forme est animée en translation sur le rail, des frottements se produisent avec un coefficient de frottement que l'on note f_x. L'ensemble du système se meut suivant l'axe x. L'équation dynamique décrivant ce système est la suivante :

$$M\ddot{x} + f_{x1}\dot{x} = F_{x1} \tag{8.4}$$

Le mécanisme de traction vis à bille/écrou est entraîné par le couple externe que l'on note T_{s1}. Ainsi on peut écrire l'équation suivante :

$$T_{s1} = J_{s1}\frac{d\omega_{s1}}{dt} + f_{s1}\omega_{s1} + T_{t1} \tag{8.5}$$

Où, J_{s1}, f_{s1} : sont respectivement le moment d'inertie et le coefficient du frottement visqueux du sous-système. T_{t1} : correspond au couple induit par la charge et ω_{s1} : la vitesse de rotation du système vis à billes.

La liaison du mécanisme de traction et de la cabine se fait au moyen des variables T_{t1} et F_{x1}. En effet, le couple de charge T_{t1} est obtenu par une transformation, décrite ci-dessous, de la force axiale F_{x1} à l'aide de la liaison mécanique :

$$T_{t1} = \frac{p_1}{2\pi\eta_1}F_{x1} \tag{8.6}$$

Où, p_1 est le pas de vis de la vis à bille souvent exprimé en mm et η_1 le rendement de la vis à bille.

Après manipulation et calcul des équations précédentes, nous avons :

$$\begin{aligned} k_{t1} i_1 &= \underbrace{\left(\frac{2\pi N_1}{p_1} J_{a1} + \frac{2\pi}{p_1 N_1} J_{s1} + \frac{p_1}{2\pi \eta_1 N_1} M \right)}_{J_1} \ddot{x} + \\ &\quad \underbrace{\left(\frac{2\pi N_1}{p_1} f_{a1} + \frac{2\pi}{p_1 N_1} f_{s1} + \frac{p_1}{2\pi \eta_1 N_1} f_{x1} \right)}_{f_1} \dot{x} \end{aligned} \tag{8.7}$$

Et :

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{2\pi N_1 k_{e1}}{p_1} \dot{x} \tag{8.8}$$

Par le biais de la transformée de Laplace, nous pouvons décrire la relation entre la position de la cabine $X(s)$ et la tension de commande $U_1(s)$ par la fonction de transfert suivante :

$$\frac{X}{U_1} = \frac{1}{s} \frac{k_{t1}}{\left[(J_1 s + f_1)(L_1 s + R_1) + \frac{2\pi N_1}{p_1} k_{e1} k_{t1} \right]} \tag{8.9}$$

8.3.2.2 Equation de mouvement siège

Comme évoqué précédemment, le siège de la cabine peut être animé suivant deux petits types de mouvements. Un seul actionneur peut réaliser soit une petite rotation de tout le siège, soit uniquement une petite rotation du dossier du siège grâce à un système manuel permettant de commuter mécaniquement les deux conditions. Ayant la possibilité de coupler le mouvement du siège au mouvement linéaire de la plate-forme nous disposons donc de cinq configurations possibles. Elles nous permettront de mener des expérimentations ayant pour objectif de tester des stratégies de commande pour la restitution de mouvement lors de l'accélération ou la décélération du véhicule.

L'approche de modélisation vue précédemment a été utilisée pour établir le modèle dynamique du siège. En effet, le système de restitution de mouvement du siège peut se décomposer en trois sous-systèmes : 1) l'actionneur, 2) le mécanisme de transmission de mouvements vis à bille/écrou, et 3) le siège de la cabine incluant le conducteur.

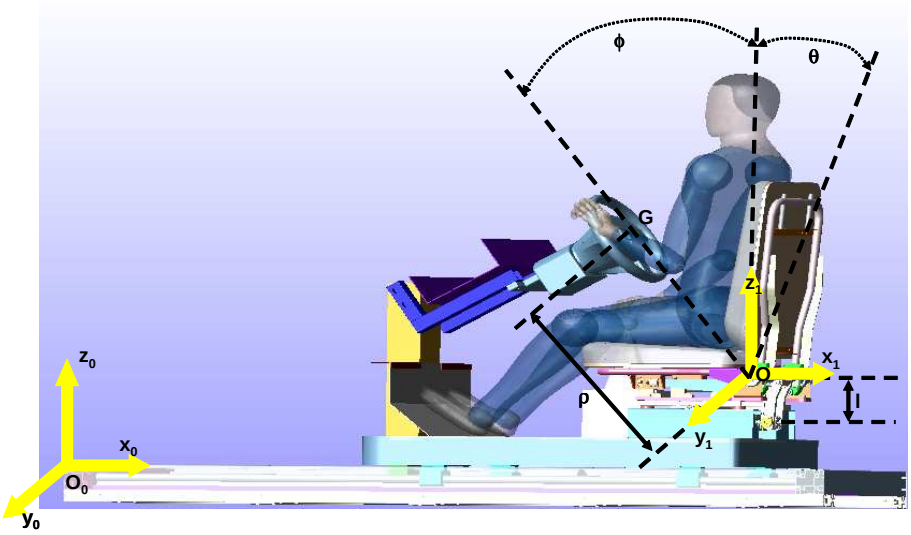

FIGURE 8.12 – *Paramètres et Repère de la plate forme mobile/siège*

Par ailleurs, la posture et le poids de l'ensemble du système sont modulables en fonction de chaque conducteur. Par conséquent, il est difficile de déterminer le centre de gravité et les paramètres de l'inertie de l'ensemble avec précision. Toutefois, on considère que le centre de gravité noté G est à une distance ρ de l'axe de rotation du siège que l'on note y. L'axe de la vis à billes est à une distance l de l'axe y. Les forces qui produisent le mouvement sur le siège ou sur son dossier sont : la force de gravité et la force axiale sur la vis à billes que l'on note F_{t2}. θ est l'angle de rotation du siège, figure 8.12.

En appliquant la loi fondamentale de la dynamique sur l'ensemble du système on obtient l'équation suivante :

$$m_t g\rho \sin(\theta+\phi) + F_{t2} l = J_{t2}\ddot{\theta} + m_t\left(\ddot{x}\rho\cos(\theta+\phi) + \ddot{\theta}\rho^2\right) \tag{8.10}$$

Où ϕ est l'angle que forme la droite liant le centre de gravité à l'axe de rotation du siège avec l'axe vertical.

En remplaçant chaque élément par son expression, par analogie au mouvement longitudinal, le mouvement du siège est gouverné par l'équation suivante :

$$k_{t2} i_2 = J_2\ddot{\theta} + f_2\dot{\theta} - \frac{p_2}{2\pi\eta_2 l N_2} m_t f(x,\theta) \tag{8.11}$$

où,

$$\begin{aligned} f(x,\theta) &= \ddot{x}\rho\cos(\theta+\phi) - g\rho\sin(\theta+\phi) \\ J_2 &= \left(\frac{2\pi l N_2}{p_2} J_{a2} + \frac{2\pi l}{p_2 N_2} J_{s2} + \frac{p_2}{2\pi\eta_2 l N_2}\left(J_t + m_t\rho^2\right)\right) \\ f_2 &= \left(\frac{2\pi l N_2}{p_2} f_{a2} + \frac{2\pi l}{p_2 N_2} f_{s2}\right) \end{aligned} \tag{8.12}$$

8.3.3 Modèle dynamique de la plate-forme dite "Lacet"

L'absence de mal du simulateur sur le mini-simulateur VIGISIM peut s'expliquer par la faible immersion visuelle (écran de taille réduite) et par la qualité de l'affichage (moniteur, utilisation de couleurs et non de textures). Toutefois, et pour des prototypes de

simulateurs plus complexes du point de vue des dispositifs d'immersion la question du mal du simulateur est posée. L'hypothèse sous-jacente aux travaux menés sur le sujet dans le cadre du projet VIGISIM est que l'absence de restitution de l'information de lacet ou que son mode de restitution inadéquat pose problème.

La plate-forme dite "Lacet" est destinée, donc, essentiellement à l'étude comportementale des usagers ainsi qu'à l'investigation de l'impact de la restitution de la composante lacet sur le mal du simulateur [42, 43]. Les aspects liés à la spécification du simulateur, la modélisation et la conception du présent simulateur seront détaillés ci-après.

8.3.3.1 Description de la plate-forme Lacet

Une des idées principales d'un simulateur de conduite est de concevoir une architecture mécanique (simple ou complexe) permettant une restitution, de qualité acceptable, des mouvements. Le perpétuel compromis que nous devons gérer est entre la fidélité de restitution, la simplicité ainsi que les contraintes de coûts. Donc, le choix de la structure de cette plate-forme est motivé par la nécessité d'avoir une perception de qualité acceptable en vertu d'une forte contrainte financière. Cette contrainte faciliterait par la suite la reproduction en faveur des écoles de conduite et d'autres institutions intéressées par ce type de simulateur. Par conséquent, ce simulateur ne reproduira pas tous les mouvements d'un véhicule standard, mais seulement les mouvements : longitudinal et lacet.

Par ailleurs, la multiplication des stimuli perceptuels (vision, son, haptique, etc.) peut fortement augmenter la qualité de présence au sein de l'environnement de synthèse. Partant de ce constat, deux systèmes de retours d'effort et sonore sont aussi implantés.

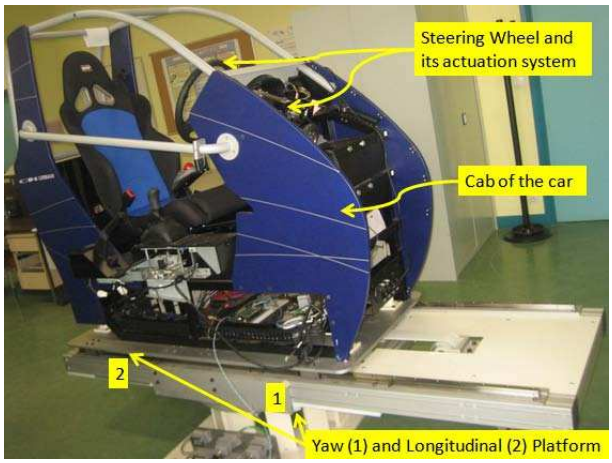

FIGURE 8.13 – *Architecture du simulateur lacet.*

La plate-forme est composée de deux parties métalliques liées par glissières mécaniques, figure 8.13. La partie haute est formée de la cabine, elle même portée par un châssis pouvant faire des mouvements longitudinaux par rapport à la partie inférieure. Cette dernière partie consiste en une structure horizontale sur laquelle est fixé le système rotation responsable du mouvement de lacet. La partie haute comprenant : la cabine, le conducteur et le châssis pèse environ 430 Kg peut faire des mouvements de ± 60 cm en longueur. A cette fin, nous avons utilisé un actionneur Brushless de type *SMB* 80 avec un système de réduction muni d'un ratio de 45. Les mouvements sont transmis via un sys-

tème de double pignon-courroie. Par conséquence, la plate-forme atteint des accélérations linéaires de l'ordre de $\pm 0.408g$ en régime permanent.

Le mouvement du lacet est muni d'un système de glissière circulaire à billes (le facteur de réduction est de 139.2) actionné par un moteur Brushless du même type que le premier utilisé pour le mouvement longitudinal. Le système lacet peut réaliser des accélérations angulaires allant jusqu'à 3.971 $^\circ/s^2$ en régime permanent.

8.3.3.2 Modélisation de la plate-forme

L'effet dynamique de la petite roue, placée en dessous de la structure verticale, est négligé. Cependant, nous avons remplacé cette dynamique par un couple résistif, issu des forces de frottement de l'interaction roue/sol. Cette supposition rend le système comme étant un système multi-corps de type série avec trois (03) corps liés par deux degrés de liberté. Dans ce cas, trois repères orthonormés sont utilisés pour décrire les différents corps de la plate-forme (figure 8.14). Le corps B_0 et le corps B_1 sont liés par une glissière paramétrée par q_1. La transformation entre les repères $\mathcal{R}_0$ et $\mathcal{R}_1$ est décrite par la matrice de rotation suivante :

$$R = \begin{pmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{8.13}$$

De plus, le corps B_2 peut faire des mouvements de translation par rapport au corps B_1. Cette mobilité est paramétrée par la variable q_2. Par conséquent, la représentation de la dynamique peut être décrite simplement par le vecteur $\mathbf{q} = (q_1, q_2)$.

$(x_{G_1}, y_{G_1}, z_{G_1})$ et $(x_{G_2}, y_{G_2}, z_{G_2})$ représentent, respectivement, les positions des centres de masses des deux corps B_1 et B_2 dans leurs repères locaux. Les vitesses angulaires des deux corps B_1 et B_2 sont données par :

$$\omega_1 = \omega_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{pmatrix} \tag{8.14}$$

De l'autre coté, les vitesses linéaires des deux corps G_1 et G_2 sont comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{G_1} &= \omega_1 \times \mathbf{O_1G_1} \\ \mathbf{V}_{G_2} &= \mathbf{V}_{O_2} + \omega_2 \times \mathbf{O_2G_2} \end{aligned} \tag{8.15}$$

Par projection de ces expressions dans leurs repères locaux, on trouve :

$$\mathbf{V}_{G_1} = \begin{pmatrix} -\dot{q}_1 y_{G_1} \\ \dot{q}_1 x_{G_1} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{8.16}$$

$$\mathbf{V}_{G_2} = \begin{pmatrix} -\dot{q}_1 y_{G_2} + \dot{q}_2 \\ (x_{G_1} + q_2)\dot{q}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{8.17}$$

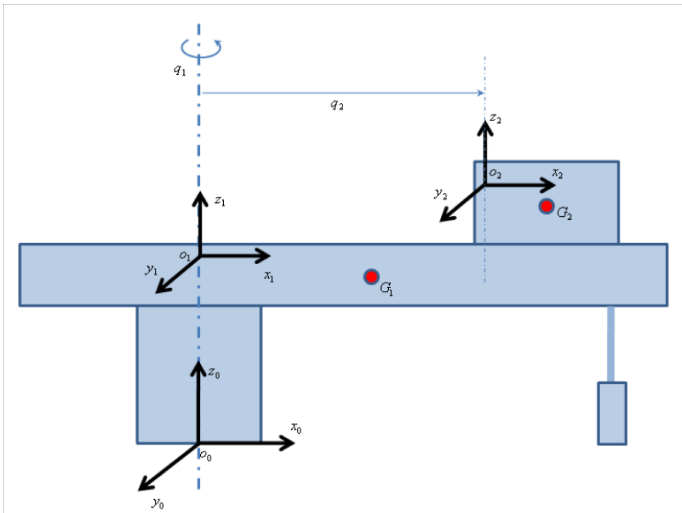

FIGURE 8.14 – *Les corps et les repères de la plate-forme*

Afin d'extraire les équations de la dynamique de ce mécanisme, plusieurs approches peuvent être utilisées, telles que : le formalisme Newton-Euler ou le formalisme de Hamilton. Nous avons utilisé le formalisme de Lagrange adapté aux structures séries, [24]. De ce fait, les équations du mouvement sont obtenues comme suit :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \tag{8.18}$$

Où $T = V - U$ est le lagrangien défini par la différence entre l'énergie cinétique du système V et l'énergie potentielle U. Dans notre cas, notre plate-forme a deux degrés de liberté en XY d'où la réduction du lagrangien T en énergie cinétique seulement :

$$T = V = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\left(\mathbf{V}_{G_i}^T \mathbf{M}_i \mathbf{V}_{G_i} + \mathbf{\Omega}_i^T \mathbf{I}_i \mathbf{\Omega}_i\right) \tag{8.19}$$

Où $\mathbf{M_1} = m_1 eye(3)$ et $\mathbf{M_2} = m_2 eye(3)$ sont respectivement les matrices d'inertie des deux corps (B_1 et B_2), $\mathbf{I_1} = diag(I_{1_{xx}}, I_{1_{yy}}, I_{1_{zz}})$ et $\mathbf{I_2} = diag(I_{2_{xx}}, I_{2_{yy}}, I_{2_{zz}})$ sont respectivement les moments d'inertie des deux corps exprimés dans leur repères locaux.

En remplaçant les équations (8.16) et (8.17) dans l'équation (8.19), l'équation précédente devient :

$$\begin{aligned} T =& \frac{1}{2}\left(m_1\left(x_{G_1}^2 + y_{G_1}^2\right) + I_{1_{zz}} + m_2 y_{G_2}^2 + m_2\left(x_{G_1} + q_2\right)^2\right. \\ &\left. + I_{2_{zz}}\right)\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{q}_2^2 - m_2 y_{G_2}\dot{q}_1\dot{q}_2 \end{aligned} \tag{8.20}$$

Les équations de mouvement de la plate-forme peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q} \tag{8.21}$$

Où $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ est la matrice d'inertie du système exprimée par :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \tag{8.22}$$

tels que :

$$\begin{aligned} m_{11} =& m_1 \left(x_{G_1}^2 + y_{G_1}^2\right) + I_{1_{zz}} \\ &+ m_2 y_{G_2}^2 + m_2 \left(x_{G_2} + q_2\right)^2 + I_{2_{zz}} \\ m_{12} =& m_{21} = -m_2 y_{G_2} \\ m_{22} =& m_2 \end{aligned} \tag{8.23}$$

et $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ est le vecteur des forces centrifuges et de Coriolis :

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{pmatrix} 2m_2 \left(x_{G_2} + q_2\right) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ -m_2 \left(x_{G_2} + q_2\right) \dot{q}_1^2 \end{pmatrix} \tag{8.24}$$

$\mathbf{Q}$ est le vecteur des forces/moments externes appliqués à la plate-forme :

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \tau_1 - \tau_{f_1} \\ \tau_2 - \tau_{f_2} \end{pmatrix} \tag{8.25}$$

τ_1 et τ_2 sont obtenus par la multiplication du moment effectif délivré par les actionneurs les coefficients de réduction respectifs :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= K_1 \tau_{a_1} \\ \tau_2 &= K_2 \tau_{a_2} \end{aligned} \tag{8.26}$$

où K_1 et K_2 sont respectivement de valeur 139.2 et 45.

τ_{f_1} and τ_{f_2} sont les couples de frottement. Ces couples de frottement sont modélisés comme étant une combinaison de frottements visqueux et secs :

$$\tau_{f_i} = K_{s_i} sign(\dot{q}_i) + K_{v_i} \dot{q}_i \qquad i = 1, 2 \tag{8.27}$$

Ce modèle dynamique de la plate-forme sert, dans un premier temps, à l'identification des paramètres inertiels essentiels pour une commande en couple plus précise. Le processus d'identification ne sera pas décrit dans ce document, [43, 42].

8.3.4 Algorithmes de Restitution de Mouvements, "ARM"

L'objectif d'un système de restitution du mouvement, lorsqu'il est conjointement utilisé avec un système de visualisation, est de stimuler les modalités perceptives du conducteur pour qu'il puisse ressentir des indices du mouvement suffisants afin de piloter le simulateur avec les mêmes performances qu'un véhicule réel. Donc, la reproduction de ces indices est l'élément central dans la simulation de conduite. Cependant, la restitution du mouvement réel à l'identique est quasiment impossible à cause des limites intrinsèques des plates-formes mobiles des simulateurs de conduite. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des techniques qui permettent de surmonter ces limitations et rendre le

mouvement à reproduire réalisable (passage d'un espace infini à un espace fini). C'est le rôle des ARM, appelés aussi "motion cueing algorithms" ou "washout algorithms".

Pour réaliser un compromis entre fidélité de restitution et respect des limites physiques de la plate-forme, différentes stratégies de commande de plates-formes ont été proposées. Elles s'articulent autour de trois principes, la restitution des mouvements transitoires, l'inclinaison de la plate-forme pour les mouvements lents et le retour à la position neutre lorsque la vitesse du véhicule virtuel est constante. L'idée de base est de réaliser une séparation fréquentielle, par des filtres dédiés, des accélérations linéaires et des vitesses angulaires. Les différences entre les divers algorithmes résident dans la manière de synthétiser ces filtres et d'ajuster les paramètres correspondants.

D'un autre côté, comprendre le mécanisme de perception du mouvement offre des indices clés pour le rendu inertiel sur un simulateur de conduite. Chez l'homme, en plus de l'œil qui capte l'information visuelle, l'appareil vestibulaire [1] est considéré comme un ensemble de capteurs gravito-inertiels responsables de la mesure des différentes quantités du mouvement. Ces capteurs sont scindés en deux types : les capteurs d'accélérations linéaires, les otolithes et les capteurs de vitesses angulaires, les canaux semi-circulaires. Néanmoins, le vestibule est incapable de détecter certains mouvements si le mouvement excitant est au-dessous du seuil de perception. D'autre part, des ambiguïtés peuvent apparaître dans l'interprétation du mouvement, autrement dit, dans la discrimination entre une translation linéaire et une rotation. Ces imperfections sont la base des algorithmes de restitution de mouvement (ARM) utilisés dans la simulation de conduite.

Dans la suite, j'aborderai succinctement les différentes approches de la restitution du mouvement et les performances sont comparées par une implémentation sur le simulateur de conduite automobile SIM^2. A la fin de cette partie, je présente les adaptations apportées aux ARM classiques afin de piloter le simulateur de conduite deux-roues.

8.3.4.1 ARM : Description générale et transcription sur le simulateur SIM^2

Les limites de l'espace physique disponible sur les plates-formes rendent la reproduction des mouvements réels irréalisable. Par exemple, un véhicule roulant à $72km/h$ nécessite une distance de 40m avec une décélération de 0.5g pour un arrêt total. Par conséquent, la question qui se pose est comment effectuer la restitution d'une accélération ou d'un freinage dans les limites des mouvements de la plate-forme, voire même lorsque la plate-forme ne possède pas de DDL dans cette direction ? C'est le rôle des ARM, qui transforment des trajectoires réelles, telles qu'elles sont calculées par le modèle de véhicule virtuel, en trajectoires réalisables qui respectent les contraintes imposées par l'architecture mécanique et technique des simulateurs, tout en satisfaisant une validité perceptive.

Dans la littérature, la plupart des techniques abordées sont plutôt empiriques et se basent essentiellement sur des évaluations objectives et subjectives recueillies lors des expérimentations. Cependant, physiquement, ces algorithmes se basent sur la notion de séparation fréquentielle des accélérations linéaires et des vitesses angulaires et profitent des imperfections des capteurs vestibulaires et du système nerveux central dans l'interprétation de certains mouvements pour leurrer le conducteur. Ainsi :

1. Nous ne intéressons pas ici à la physiologie de l'oreille interne, organe de perception, ni à sa modélisation, nécessaire dans certains cas de commande ARM. Les travaux de recherche dans le domaine peuvent être résumés par dans les références suivantes : [208, 209, 210, 211, 212, 213]

- Les composantes HF des accélérations dites transitoires, de faibles durées/portées, sont reproduites directement par un mouvement linéaire de la plate-forme.
- Les composantes BF dites lentes sont restituées en inclinant la cabine de la plate-forme mobile pour récupérer une partie du vecteur de la gravité. Cette inclinaison sera interprétée comme une accélération linéaire si elle est inférieure au seuil de perception pour ne pas être détectée comme une rotation/inclinaison. Cette technique est communément connue sous le nom de "Tilt-coordination".
- Enfin, quand l'accélération est nulle, la vitesse constante correspondante est rendue par une simple projection visuelle. Durant cette phase, la plate-forme mobile est ramenée à sa position neutre afin de disposer une nouvelle fois d'un espace de déplacement suffisant pour entamer un nouveau cycle d'accélération. Ce retour, connu dans la documentation sous le nom de "Washout", doit être réalisé avec une accélération d'amplitude inférieure au seuil de perception des organes otolithiques pour ne pas créer une fausse illusion et perdre la cohérence de la simulation de conduite.

Pour la séparation fréquentielle, des filtres passe-haut et passe-bas sont utilisés. La plupart des approches proposées diffèrent principalement dans la forme et le schéma d'optimisation utilisé pour l'implémentation de ces filtres. Alors, on distingue :

- L'approche classique : les coefficients des différents filtres sont constants et fixés au début de la simulation de conduite.
- L'approche adaptative : permet d'adapter les paramètres des filtres par une minimisation "en ligne" d'une fonction de coût traduisant le compromis entre la restitution des accélérations et le respect des contraintes mécaniques.
- L'approche optimale : les filtres sont optimisés hors-ligne ou en temps-réel en minimisant un critère qui intègre directement les contraintes mécaniques et perceptives.

Nous présentons dans la suite le principe d'ARM classiques et nos contributions dans le réglage des paramètres des différents filtres. Les ARM optimal [214, 215] et adaptatif [216, 217] ne seront pas discutés.

8.3.4.2 Algorithme classique

La méthode classique a été proposée par [218] comme une approche de restitution de mouvement pour la plate-forme Gough-Stewart de la NASA. Le principe est de séparer les mouvements du véhicule en deux parties distinctes : les mouvements lents (ou soutenus) et transitoires (ou instantanés).

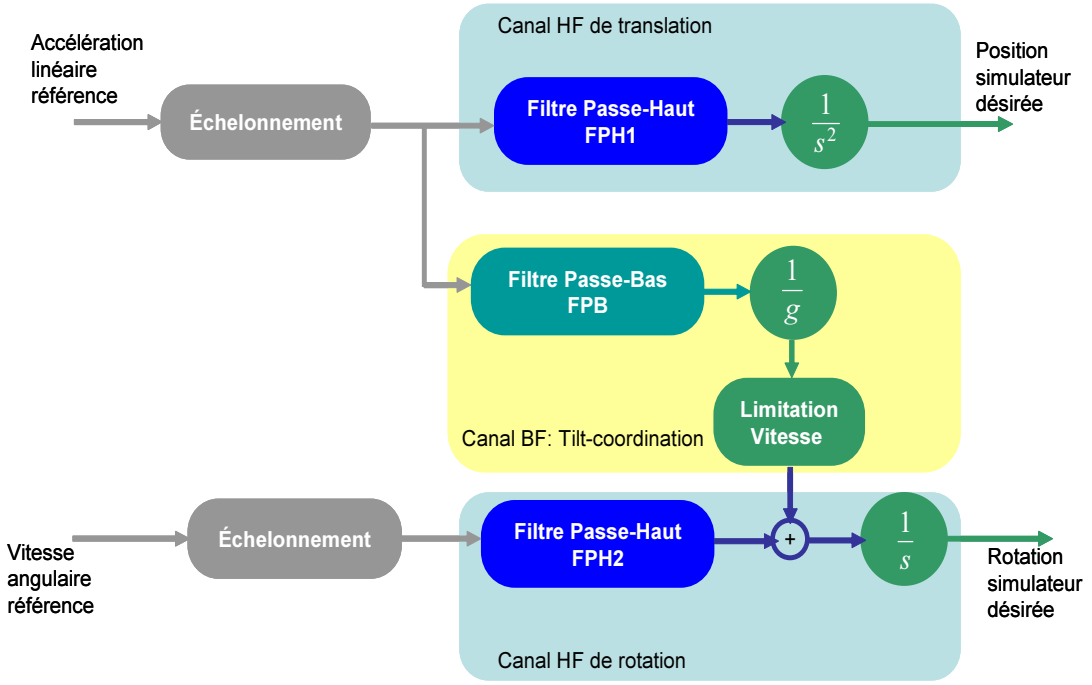

FIGURE 8.15 – *Algorithme classique*

D'après la figure 8.15, l'algorithme classique se résume comme suit :

- L'accélération linéaire, ainsi que la vitesse angulaire de référence subissent une réduction de leurs amplitudes par un facteur d'échelle. Cela permet de minimiser encore les déplacements linéaire et angulaire nécessaires pour reproduire une manœuvre de conduite donnée. Rappelons que le but est de créer une illusion d'accélération ou de freinage et que la poursuite à l'identique des mouvements réels n'est pas une exigence primordiale dans la simulation de conduite.
- L'accélération échelonnée est ensuite passée au travers d'un filtre passe-haut (FPH1) pour extraire la composante transitoire. Cette partie est directement intégrée pour calculer la position désirée à envoyer à la plate-forme mécanique du simulateur.
- La composante soutenue obtenue par un filtrage passe-bas (FPB) est exploitée pour définir l'angle d'inclinaison de la plate-forme par rapport au vecteur directeur de la gravité.
- A l'instar du canal HF de translation, celui de la rotation permet d'extraire la partie HF de la vitesse angulaire. Le signal résultant et celui obtenu par le canal "tilt" sont additionnés et intégrés pour définir la rotation désirée du simulateur.

Le premier élément à spécifier est l'ordre du filtre passe-haut pour le canal de translation. Un filtre de deuxième ordre est nécessaire pour borner la position de référence en réponse à un signal d'accélération de type échelon, ce qui veux dire, qu'un troisième ordre est nécessaire pour réaliser un retour à la position neutre [219]. Par la suite, nous adoptons un filtre passe-haut de troisième ordre constitué de deux parties : filtrage et washout. Sa fonction de transfert est donnée par la formule suivante :

$$HPF(s) = \frac{a_s(s)}{a_v(s)} = K \underbrace{\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}}_{\text{Filtrage}} \underbrace{\frac{s}{s + \omega_f}}_{\text{Washout}} \tag{8.28}$$

où a_v, a_s sont respectivement l'accélération du véhicule réel et celle à reproduire sur le simulateur. K, ω_n, ω_f et ζ sont des paramètres à ajuster.

L'effet des paramètres du filtre passe-haut est résumé en trois points :

- La pulsation ω_n réalise un compromis entre la fidélité de la restitution d'accélération et le respect des contraintes mécaniques en déplacement linéaire.
- Le coefficient d'amortissement ζ permet de diminuer le dépassement du filtrage, et ainsi d'éviter une incohérence de la simulation.
- L'introduction de la pulsation ω_f est nécessaire pour un retour à la position neutre de la plate-forme mobile. Ainsi, cette pulsation réalise un compromis entre le respect des contraintes perceptives et la rapidité de l'algorithme de washout.

Enfin, le tilt-coordination ou l'inclinaison de la plate-forme est mis en œuvre en profitant d'une ambiguïté sensorielle propre au système nerveux central. En effet, certains signaux vestibulaires ne seront pas d'amplitude suffisante pour discriminer une translation d'une rotation. Par conséquent, dans les simulateurs de conduite, le tilt-coordination est utilisé pour restituer une partie de l'accélération continue, c'est-à-dire, le conducteur est incliné, par rapport au plan horizontal mais avec une vitesse de rotation inférieure au seuil de détection des canaux semi-circulaires. Toutefois, l'environnement visuel doit suivre cette inclinaison de manière à ce que l'horizon de la scène visuelle reste cohérent avec ce mouvement et ne déstabilise pas les sujets [220]. En respectant ces exigences, les otolithes sont stimulés par une accélération d'amplitude $g \sin\theta$ où θ est l'angle d'inclinaison de la cabine du conducteur. Techniquement, le filtre passe-bas utilisé peut être du premier ou de deuxième ordre pour lesquels les différents paramètres sont réglés de manière à réaliser un compromis entre les contraintes physiques d'inclinaison et le maintien de la vitesse de rotation en dessous du seuil de détection.

Cependant, certaines questions persistent lors de l'utilisation de cette technique. Comment peut-on reproduire des manœuvres rapides sachant qu'il faudrait s'incliner avec une vitesse relativement faible pour ne pas éveiller les canaux semi-circulaires ? Comment surpasser le réglage au pire-cas, et exploiter les pleines performances de la plate-forme mécanique ? Des réponses sont apportées par l'utilisation de méthodes optimales et adaptatives, qui seront discutées dans les prochaines sous-sections.

8.3.4.3 Contribution au réglage des paramètres des filtres classiques

Jusqu'à présent, le réglage des différents paramètres se fait par essais-erreurs, afin de respecter les différentes contraintes imposées et répondre aux divers compromis. Toutefois, pour pallier ce problème de synthèse, nous avons proposé une méthode qui permet de limiter l'espace des paramètres à choisir en se basant sur les exigences liées à la perception (seuils) et les performances cinématiques (Figure 8.16). L'avantage de cette démarche réside, entre autres, dans l'intégration de la dynamique des actionneurs (non négligeable) sur les performances du simulateur de conduite [22, 23].

Nous avons précisé que pour réaliser un retour à la position neutre, un filtre passe-haut de troisième ordre est indispensable. Néanmoins, cette condition est liée aux situations extrêmes où l'accélération longitudinale est un échelon d'amplitude donnée. Pour des manœuvres plus modérées (cas des situations de conduite normale), un filtre de deuxième ordre est suffisant. Par conséquent, on peut approximer la position de la plate-forme obtenue par l'intermédiaire d'un filtre *washout* par la réponse impulsionnelle de la fonction de transfert suivante :

$$\frac{P(s)}{a_v(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{8.29}$$

où : $P(s)$ est la position de la plate-forme mobile et $a_v(s)$ représente l'accélération du véhicule. La réponse impulsionnelle de ce filtre est donnée par l'expression temporelle :

$$h(t) = \frac{K}{\tau_1 - \tau_2}\left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right] \tag{8.30}$$

où $\tau_{1,2} = (\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})/w_n$ pour $\zeta > 1$. A partir de cette équation, on peut déduire les valeurs maximales en position, en vitesse et en accélération comme suit :

$$|P_{max}| = K\omega_n\xi < L \left|\dot{P}_{max}\right| = K\omega_n^2\xi^2 < v_s \left|\ddot{P}_{max}\right| = K\omega_n^3\xi^3 < a_s \tag{8.31}$$

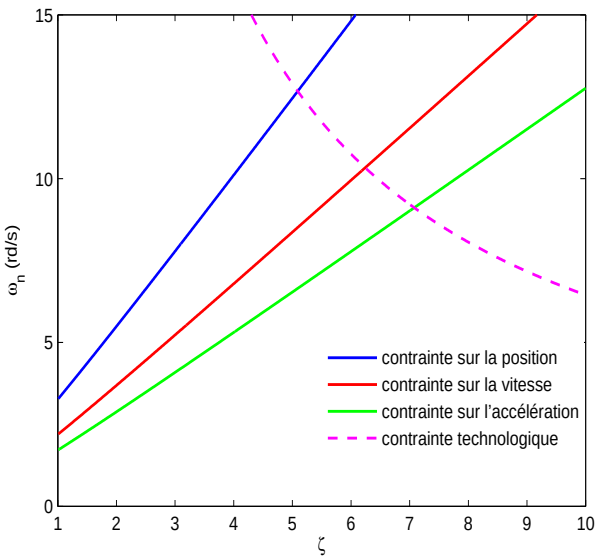

FIGURE 8.16 – *Domaines des paramètres acceptables pour ω_n et ζ. L =0.6m, v_s = 0.048 m/s et a_s = 0.03m/s^2 utilisant un actionnement via un moteur Parvex NX620EAR*

avec L, v_s, a_s, respectivement, l'espace de travail maximal du simulateur et les seuils de perception en vitesse et accélération. ξ est un coefficient qui dépend de l'amortissement ζ, [38].

De plus, la contrainte d'actionnement concerne le frottement propre de la simulation, et par conséquent, sa dépendance directe aux paramètres des actionneurs et du filtre de washout (ces deux blocs sont montés en cascade). Précisément, pour profiter au maximum des caractéristiques des actionneurs (synthèse pendant le dimensionnement initial), le filtre washout doit être sélectionné de manière à minimiser le frottement total [38]. Pour cela, une condition est nécessaire :

$$2\zeta\omega_n < f_0 \tag{8.32}$$

où f_0 est le frottement propre de système d'actionnement. Si cette condition n'est pas satisfaite, la simulation dépend seulement des paramètres de l'actionneur, et par la suite, le réglage de l'algorithme de restitution de mouvement peut être limité ou sans effet.

8.3.4.4 Discussion sur les ARM et implémentation sur le simulateur SIM^2

L'ajustement des paramètres des ARM, généralement effectué par une méthode de type essais-erreurs, est loin d'être une tâche facile. Plusieurs approches ont été proposées pour valider le choix de ces paramètres. On trouve par exemple la comparaison de la réponse des filtres vestibulaires entre un conducteur sur simulateur et celui sur un véhicule réel. Néanmoins, ces filtres ont été originellement développés pour les simulateurs de vols. L'utilisation directe de ces derniers dans le cadre de la simulation de conduite véhicule automobiles et deux-roues montre quelques incompatibilités. En effet, [221] montrent l'insuffisance de la composante haute-fréquence des modèles vestibulaires usuels.

Le manque de compréhension de la perception du mouvement sur simulateur chez l'homme rend difficile l'optimisation a priori des coefficients de filtrage pour une meilleure restitution du mouvement. La solution actuelle, complètement subjective, consiste en une technique d'essais-erreurs. Le remplacement du réglage subjectif par une procédure d'optimisation mathématique serait évidemment bénéfique. Les tentatives antérieures d'optimisation mathématique des filtres washout ont eu un succès limité. De plus, pour prédire la perception du mouvement, des modèles mathématiques du système vestibulaire ainsi que des modèles d'intégration et d'interprétation sont nécessaires. Etant donné ces ambiguïtés, il n'est pas surprenant de constater que tous les algorithmes de restitution du mouvement déjà développés ne prennent en considération que le système vestibulaire.

D'un point de vue performance, la stratégie adaptative semble plus performante pour la minimisation des faux mouvements. De plus, l'accélération produite par le canal tilt-coordination est plus rapide. Elle nécessite un minimum de déplacements linéaires pour une meilleure restitution. Cependant, cette technique ne respecte pas les limites perceptives, essentiellement pour le canal de rotation.

Pour l'algorithme optimal, la réponse des otolithes est plus nette et les seuils de perception sont bien respectés, ce qui est logique puisqu'un modèle du système vestibulaire est directement intégré dans le développement des équations. Cependant, cette méthode conduit à un déplacement linéaire beaucoup plus important pour des performances inférieures à celles obtenues avec la formulation adaptative.

Enfin, l'algorithme classique semble réaliser un bon compromis entre les deux approches précédentes. Une mise en œuvre simple et l'ajustement des paramètres est explicite, il n'est pas étonnant de le voir adopté par la plupart des simulateurs existants [222]. De plus, divers artifices [223] ont été développés pour minimiser les fausses restitutions (backlash) générées par la linéarité des filtres passe-haut, ce qui rend cette technique beaucoup plus attractive surtout pour des organismes exploitants non spécialistes.

Afin de consolider ces résultats théoriques, obtenus par simulation, nous avons implémenté l'ensemble des approches ARM décrites auparavant sur le simulateur automobile SIM^2 (le premier prototype, section 8.3.2). Nous cherchions à évaluer, d'une manière purement objective, les performances de chaque stratégie sur un simulateur à bas coût destiné à la simulation de conduite en file.

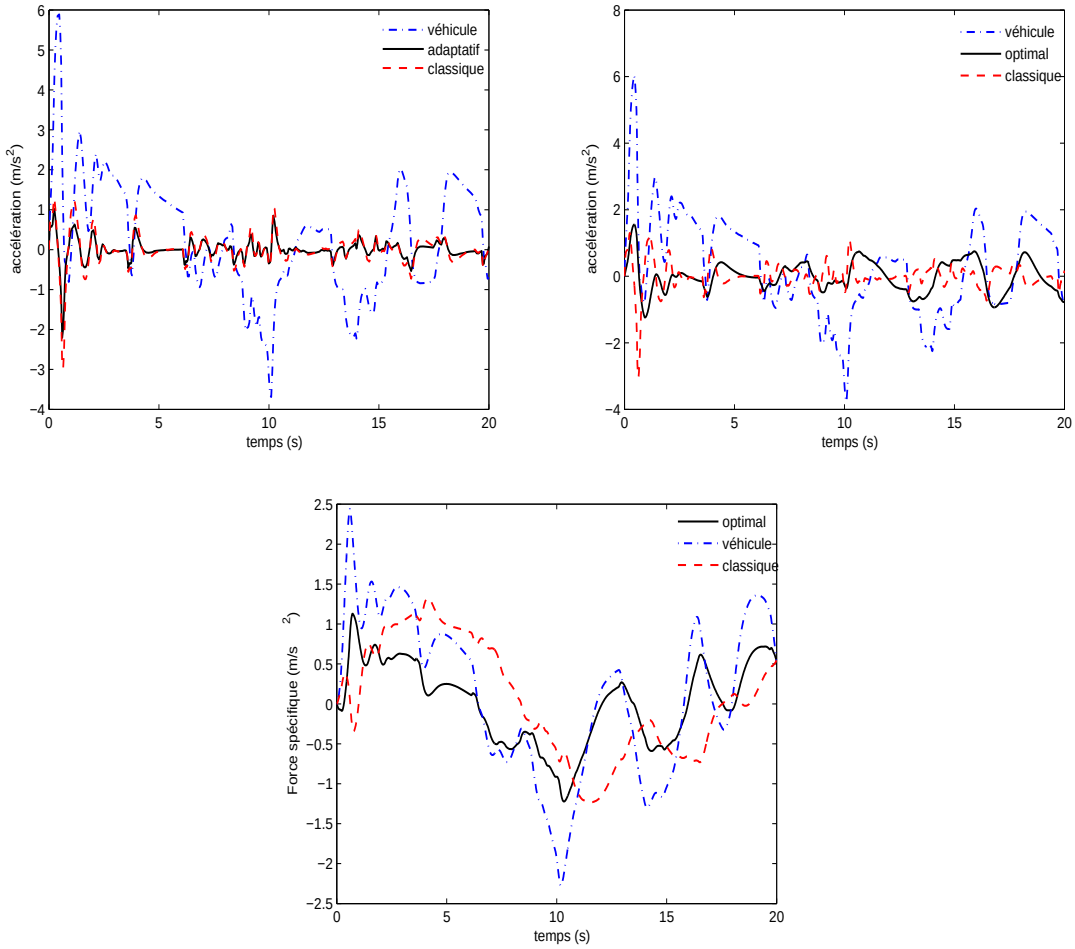

FIGURE 8.17 – *Comparaison des performances des divers algorithmes de restitution de mouvement sur le simulateur SIM²*

L'ensemble des figures 8.19 montre qu'en l'absence de tilt-coordination, les algorithmes adaptatif et classique présentent des performances approximativement similaires. En effet, le rendu du mouvement est meilleur avec l'approche classique, plus particulièrement, pendant les phases d'accélération. En revanche, l'approche adaptative, via l'optimisation de gain du filtre, permet de minimiser le mouvement résiduel généré par la linéarité des filtres passe-haut lors des phases du freinage. D'un autre côté, l'algorithme optimal permet un meilleur rendu des accélérations/freinages par rapport aux deux autres approches, au prix d'un déplacement beaucoup plus important, pas toujours possible sur des plates-formes à bas coût.

8.3.5 Résultats pratiques et Expérimentations

8.3.5.1 Optimisation des mouvements linéaires sur le simulateur SIM² en condition normale de trafic

Dans ces expérimentations, nous avons essayé d'explorer les différents mouvements accessibles par la plate-forme afin de définir la configuration de mouvements permettant de produire un effet inertiel minimal mais suffisant pour améliorer la conduite sur

simulateur. Pour ce faire, nous nous intéresserons au contrôle de l'accélération et du freinage pour la régulation de la vitesse du véhicule virtuel pendant le suivi d'un " véhicule lièvre ". Généralement, une telle situation contraint le conducteur à réajuster sa vitesse en fonction des variations de vitesses du véhicule suivi.

Par ailleurs, nous avons pris en considération différentes caractéristiques individuelles des sujets afin de déterminer si la restitution des mouvements a un effet différent selon les caractéristiques des participants. Par conséquent, nous pourrons déterminer si nous sommes en mesure de définir une configuration de mouvement susceptible d'être appréciée par la majorité des conducteurs, particulièrement si la plate-forme est dédiée à l'entraînement à la conduite.

Deux conditions principales sont prises en compte pendant l'expérimentation, les inclinaisons du dossier du siège et le mouvement longitudinal de la plate-forme. Le siège présente deux configurations possibles (activation ou désactivation des inclinaisons du siège) tandis que le mouvement de la plate-forme présente trois configurations possibles (sans mouvement longitudinal, court mouvement longitudinal, long mouvement longitudinal). Les sujets vont conduire le simulateur pendant une durée de cinq minutes, pour chacune de ces 6 conditions expérimentales, à savoir :

1. Inclinaison du dossier non active (S) et Sans mouvement longitudinal (S) : SS
2. Inclinaison du dossier non active (S) et Court mouvement longitudinal (C) : SC
3. Inclinaison du dossier non active (S) et Long mouvement longitudinal (L) : SL
4. Inclinaison du dossier active (M) et Sans mouvement longitudinal (S) : MS
5. Inclinaison du dossier active (M) et Court mouvement longitudinal (C) : MC
6. Inclinaison du dossier active (M) et Long mouvement longitudinal (L) : ML

Les rotations et les accélérations angulaires maximales restituées pendant l'expérimentation sont respectivement de $4°$ et $4 rad/sec^2$. Les déplacements et accélérations maximum que l'on peut atteindre pendant la condition "court mouvement" sont respectivement de $\pm$ 10cm et $0.25g$, tandis que les déplacements et accélérations pour la condition "long mouvement" sont respectivement de $\pm$ 30cm et $0.3g$.

32 sujets ont participé à l'expérimentation. Ce groupe dont l'âge était compris entre 19 et 62ans, était constitué de 12 femmes et de 20 hommes. Ils étaient tous titulaires d'un permis de conduire et ont été recrutés soit sur le site de l'INRETS, soit par des contacts personnels. Pour réaliser une bonne évaluation des différents mouvements proposés, nous avons enregistré des mesures subjectives et objectives :

- **Mesures subjectives** Les mesures subjectives enregistrées sont principalement les rangs attribués par le sujet pour chacune des restitutions de mouvement. Ces rangs permettront d'établir un classement, par ordre de préférence, entre les différentes situations proposées. Les commentaires liés au réalisme des accélérations et des freinages perçus ont également été pris en considération.
- **Mesures objectives** Les mesures objectives enregistrées durant l'expérimentation sont, les temps inter-véhiculaire (TIV), les temps de réaction (TR), les variances des décélérations (VAR_{dec}). Le TIV représente le temps nécessaire au véhicule piloté pour parcourir la distance séparant ce dernier (simulateur) du "véhicule lièvre". Le TR représente le temps entre le moment où le "véhicule lièvre" opère une action de freinage ou d'accélération et le moment où le conducteur réagit à cette dernière. Le VAR_{dec} représente la variance des accélérations du véhicule piloté.

L'analyse des résultats, liés à l'appréciation subjective des conditions par les sujets, a conduit au choix des deux conditions CM et SM qui semblent être appréciées par le plus grand nombre de participants d'un point de vue subjectif. Par ailleurs, globalement, les conditions incluant les mouvements du siège sembleraient être subjectivement mieux appréciées.

Il en sort aussi que les déplacements longitudinaux seuls de la plate-forme (" CS " et " LS ") ne semblent pas être suffisants pour améliorer les performances de la conduite comparé à un simulateur à base fixe (" SS "). Cependant, les inclinaisons du siège (" SM ", " CM ", " LM ") semblent avoir un effet positif sur les performances des conducteurs.

L'expérimentation que nous avons présentée était la première à être menée sur la plate-forme mobile que nous avons réalisée, de ce fait, d'autres études psychophysiques seraient nécessaires pour améliorer les résultats et évaluer la validité du simulateur pour d'autres situations de conduite.

8.3.5.2 Tests de validation de la plate-forme Lacet

Des tests de validation ont été réalisés sur cette nouvelle plate-forme sans toutefois évaluer le ressenti et les rendus de mouvements.

La première expérimentation a porté uniquement sur le rendu de l'information de lacet, degré de liberté le plus novateur. Il n'est pas envisagé de réaliser des rotations de 360 degrés voire plus, et donc un filtre washout s'avère nécessaire pour ramener la plate-forme vers la position centrale et optimiser la plage utilisable de rotation, sans que cela soit perçu par le conducteur. Une première version d'un tel filtre a été développée, elle entre en action dès que l'accélération et la vitesse angulaire de la plate-forme tombent sous un certain seuil. Elle remplace le mouvement en cours par un mouvement en direction de la position centrale avec une accélération et une vitesse paramétrables (et choisies pour être sous les seuils vestibulaires). Les mouvements de restitution du lacet passent donc sans altération par ce filtre dès qu'ils sont au-dessus des seuils perceptifs. Le choix d'utiliser cette approche a été fait car la plate-forme a une plage de mouvements larges (supérieure à 90 degrés dans les deux sens de rotation) mais aussi parce qu'elle n'est pas capable d'induire une illusion de rotation via une stimulation physique (comme l'illusion d'accélération linéaire via une inclinaison, sur une plate-forme type "Stewart").

Il est donc possible de reproduire le lacet grandeur nature, c'est-à-dire, de faire coïncider l'orientation de la plate-forme avec le cap du véhicule virtuel, du moment que la trajectoire à suivre dans l'environnement le permet.

Nous avons fait une première expérience dans laquelle nous avons comparé deux modes de restitution du lacet (dont le mode 1 : 1) avec une absence de restitution. Trois modes ont donc été comparés :

- mode 1 : l'angle de rotation de la plate-forme était donné par la vitesse de lacet du véhicule virtuel, après filtrage par un filtre passe-bas.
- mode 2 : restitution du cap du véhicule (mode 1 : 1)
- mode 3 : plate-forme statique.

L'environnement virtuel consistait en une voie express (2x2 voies) avec deux grands virages d'environ 45° (une fois à gauche et une fois à droite). L'image était projetée sur six écrans de $2m50$ x $1m87$ arrangés en demi-cercle autour de la plate-forme.

Les participants (3 sujets) avaient comme consigne de conduire "naturellement", en respectant le code de la route. Une première analyse des résultats subjectifs indique que les sujets ont tous, dans la situation de conduite autoroutière choisie, une nette préférence

pour le mode 2 surtout par rapport au mode 1. Ce premier test avait essentiellement pour objet de démontrer le caractère fonctionnel de la plate forme. Des expérimentations devront être conduites afin d'explorer l'intérêt de l'information de lacet et les modalités de cette information, et ce pour des situations réputées nauséeuses telles que des situations de conduite en ville.

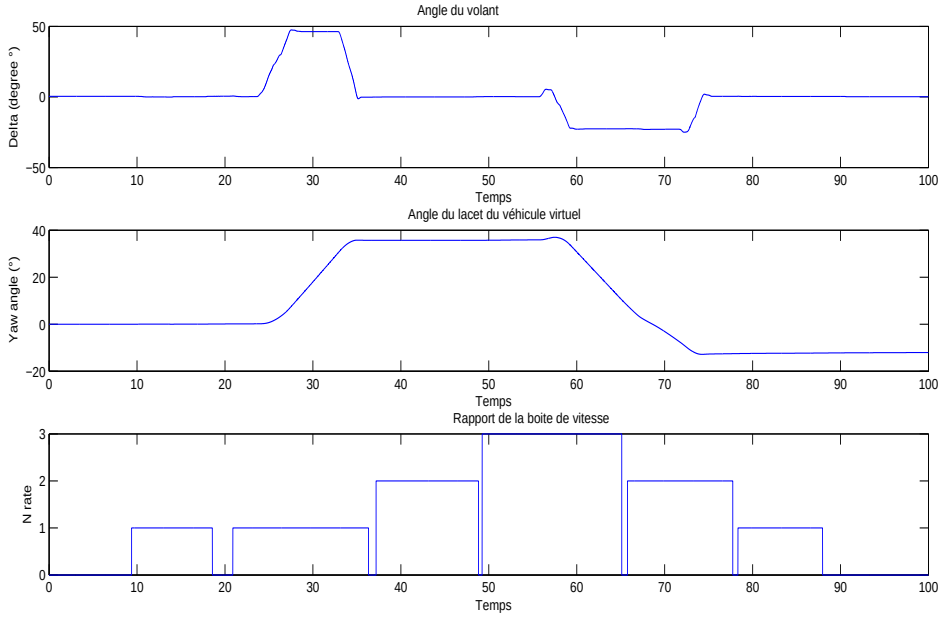

FIGURE 8.18 – *a- Angle du volant, b- Angle du lacet du véhicule virtuel et c- Rapport de la boîte de vitesse durant la conduite*

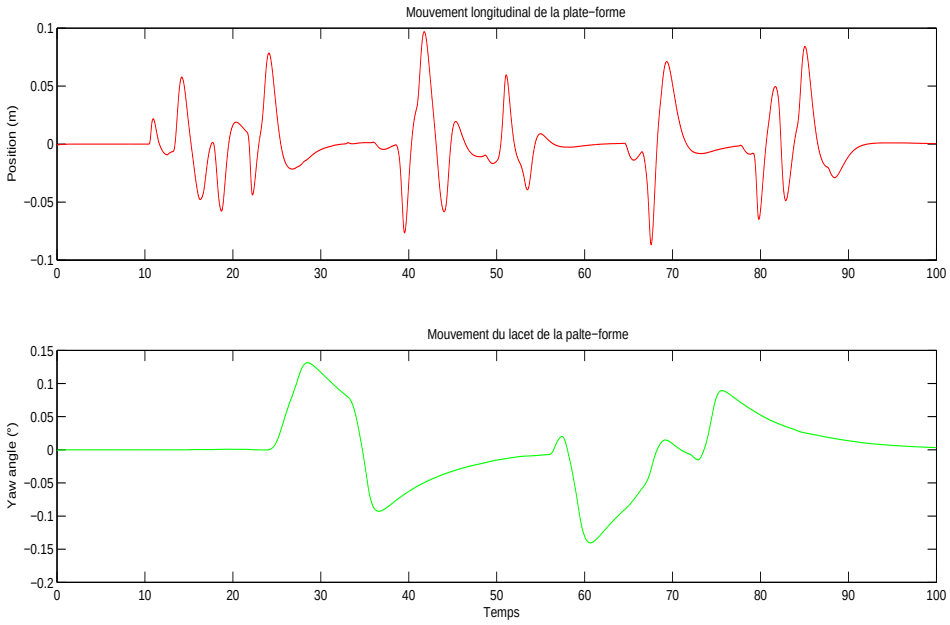

FIGURE 8.19 – *a- Position longitudinale de la plate-forme et b- Angle du lacet de la plate-forme*

Les figures 8.18 et 8.19 présentent des relevés de résultats sur une opération de conduite réalisée par un conducteur sur le simulateur et traduisent la capacité du simulateur à reproduire une succession de mouvements. Pour l'accomplissement de ces expérimentations nous avons implémenté un algorithme de restitution "washout" type classique. Le scénario de conduite consistait en un ensemble de manœuvres d'accélérations / décélérations. Ces consignes sont appliquées au modèle dynamique du véhicule virtuel qui à son tour délivre les entrées en termes d'accélérations, au module de contrôle qui génère les trajectoires appropriées pour le simulateur.

Des résultats supplémentaires peuvent être consultés sur [24].

8.4 Deuxième partie : Simulateur de conduite deux roues

Bien que d'énormes moyens aient été investis pour améliorer le confort et la sécurité des conducteurs de véhicules automobiles, ceux des deux-roues n'ont fait que l'objet d'une priorité secondaire. Durant les dernières années, la sensibilisation publique et les défis écologiques ont forcé les gouvernements à réagir.

En effet, après les flambées des prix du carburant et la congestion du trafic, en particulier dans les grandes agglomérations, le parc des véhicules deux-roues est en croissance régulière. Pour toutes ces raisons, les instituts de recherche s'efforcent d'pporter des réponses adaptées au problème de la sécurité des motocyclistes en développant des travaux sur le comportement des motards, dont le risque d'accident mortel est beaucoup plus élevé que celui des autres usagers.

Pour toutes ces raisons, les travaux de référence sur les simulateurs de véhicule deux-roues sont très peu nombreux comparés à ceux effectués sur les véhicules automobiles. Les principaux travaux ont été effectués par des institutions industrielles japonaises et

italiennes, leaders mondiaux dans le domaine des véhicules deux-roues. Dans ce qui suit nous discuterons brièvement quelques prototypes :

– **Simulateurs Honda** Pour Honda, les deux objectifs du développement d'un simulateur moto sont : (1) l'étude de la manœuvrabilité sur un simulateur de conduite et (2) l'étude de la fonctionnalité de la formation pour assurer la sécurité des sujets.
Plusieurs prototypes ont été réalisés. Le premier prototype a été conçu en 1988 pour tester la faisabilité de la simulation de conduite à reproduire des manœuvres de base pour la formation des motards (figure 8.20 (a)). La plate-forme mobile présente 5DDL actionnés (roulis, lacet, tangage, latéral et rotation du guidon). Un mécanisme en berceau a été développé pour simuler la sensation d'accélération continue. Un modèle dynamique linéarisé à 4DDL est utilisé pour la simulation du comportement dynamique de la moto. Toutefois, il a été constaté que le conducteur ne pouvait pas contrôler le simulateur durant la prise d'un virage à cause de l'absence de la force centrifuge, et donc, l'accélération latérale est différente de celle expérimentée dans une conduite réelle (sans contre-braquage)) mais plutôt semblable à une conduite sur automobile, [224, 225].

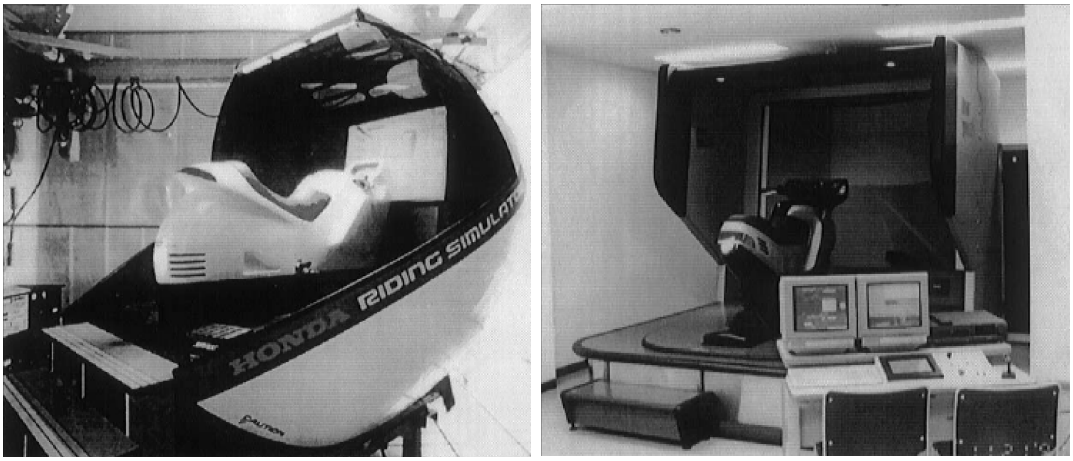

FIGURE 8.20 – *(a) Simulateur de Honda : Prototype 1 et (b) Simulateur de Honda : Prototype 2*

Pour pallier ces problèmes, un deuxième prototype a été développé (Figure 8.20 (b)) ayant pour objectif la formation dans un environnement sécurisé. Par conséquent, la contrôlabilité du simulateur était plus intéressante qu'une simple reproduction des caractéristiques. L'architecture de la plate-forme a été complètement modifiée. Le système de berceau a été supprimé. Cette version fut commercialisée en 1996, appuyée par une législation japonaise obligeant tout candidat à effectuer un certain nombre d'heures de conduite sur simulateur avant de voir l'attribution de sa licence [226].
Enfin, Honda commercialise son simulateur "*low-cost*" de conduite deux-roues : le Honda Riding Trainer (Figure 8.21). La mission première de cet outil pédagogique est d'initier le pilote à la conduite d'un deux-roues motorisé dans un environnement urbain tout en bénéficiant d'un contexte de sécurité absolue. Il s'adresse en premier lieu aux motos écoles, les formateurs professionnels peuvant l'acquérir à un prix de lancement d'environ 3000 €.

FIGURE 8.21 – *Le simulateur Honda Riding Trainer*

– **Simulateur Moris** Ce simulateur est né d'une collaboration entre le laboratoire PERCRO et le fabricant de véhicules deux-roues Piaggio. Désigné comme un outil de prototypage rapide, il se base sur une plate-forme parallèle type Gough-Stewart à 6DDL hydrauliquement actionnés plus la rotation du guidon [227]. Un châssis original de scooter réel est fixé à la plate-forme mobile (Figure 8.22). En plus des degrés de liberté, le guidon est instrumenté d'un servomoteur type Brushless offrant un couple max de 15 N.m pour le retour d'effort.

FIGURE 8.22 – *Simulateur MORIS du laboratoire Percro - Italie*

Dans le domaine de la simulation de conduite sur un deux roues, la France reste malheureusement un pays en retard. Les avantages qu'offre une telle solution sont multiples et résident essentiellement dans l'étude du comportement des conducteurs et, pourquoi pas, dans la validation de nouvelles technologies relatives à la sécurité (préventive, ac-

tive, etc.). Pour toutes ces raisons et en collaboration étroite avec l'INRETS, nous avons conçu un premier prototype bas coût assurant une qualité de perception suffisante pour la conduite sur un deux roues ayant pour objectifs :

- **Formation au risque** : en moto, certaines situations sont irrattrapables, comme le dérapage de la roue avant. Le simulateur doit malgré tout permettre à l'apprenti d'analyser qu'il s'est engagé dans cette situation. Dans ce cas de figure, le temps de passage entre stabilité et instabilité est très court, par conséquent, la reproduction de ce comportement implique des performances d'actionnement importantes.
- **Observation des comportements** : pour ce type d'utilisation, la finalité est de permettre aux chercheurs de comprendre les indices perçus par le conducteur pour le développement de systèmes d'aides à la conduite ou d'infrastructures particulières. Les cas limites doivent donc être produits aussi bien que les cas de conduite normale.

D'autre part, les architectures de simulation pour les véhicules deux roues motorisés sont identiques à celles des véhicules automobiles. Les aspects relatifs à la modélisation des deux roues étant déjà abordés dans le précédent chapitre, nous nous intéressons dans la suite aux seuls aspects à prendre en compte dans la conception d'un simulateur dédié à la conduite d'un deux-roues.

8.4.1 Aspects de conception et de mécanique

Le choix de l'architecture de la plate-forme du simulateur est guidé par les besoins justes nécessaires pour assurer un niveau de perception suffisant préalablement défini. Notre objectif concerne les deux cadres distincts que sont la formation au risque avec pour but la sensibilisation aux situations accidentogènes, et l'observation comportementale en conduite normale et plus particulièrement en situation urbaine. Les utilisateurs finaux peuvent donc aussi bien être des centres de formation ou des organismes d'étude du comportement ou de la sécurité routière. Le système doit donc être d'un coût acceptable, facilement transportable et les solutions techniques doivent en tenir compte.

Pour les deux objectifs fixés, la mise en situation doit privilégier la restitution fidèle des mouvements. Cette idée est compatible avec la contrainte de développement d'un outil bas coût commercialisable. A partir de ces considérations, les degrés de liberté privilégiés pour notre architecture sont :

- Le roulis : étant le mouvement le plus important dans la dynamique de la moto. Ce degré de liberté est essentiel à la stabilisation et au guidage du véhicule. Il intervient surtout dans la simulation de manœuvres de prise de virages, de slalom et de changement de voie. C'est une composante commune développée sur toutes les plates-formes mobiles des véhicules de deux-roues.
- Le tangage : ce mouvement est utilisé pour restituer une partie de l'accélération longitudinale, les phases de freinage et les plongées de la fourche. Comparativement aux voitures, ce mouvement est très caractéristique des motos et s'avère important pour la conduite d'un deux-roues.
- Le lacet : ce mouvement a été sélectionné spécifiquement pour reproduire le dérapage de la roue arrière de la moto comme dans le cas de situations classiques de danger.

Le déploiement des mouvements longitudinaux et latérauxl n'ont pas été retenus dans ce premier prototype (Figure 8.23).

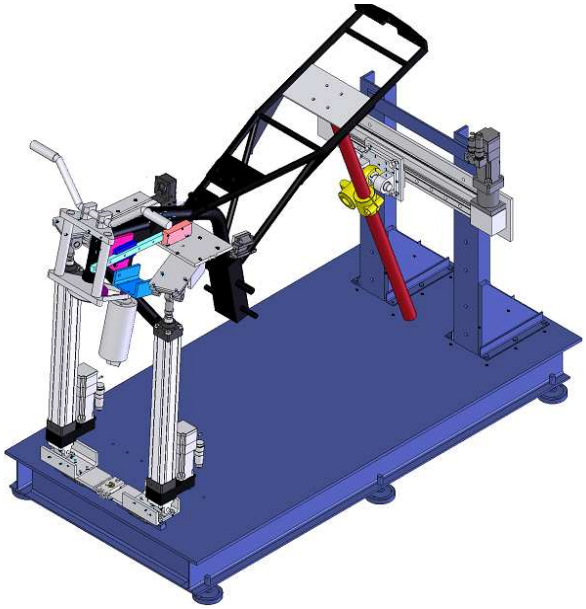

FIGURE 8.23 – *Modèle CAO de la plate-forme mécanique du simulateur deux-roues*

Partant du fait que la multiplication des stimuli de la perception augmente fortement la qualité de la simulation, un double retour d'effort a été mis en œuvre sur le guidon (Figure 8.24). Le premier retour de force permet de restituer un retard inertiel du buste du conducteur pendant les phases d'accélération et de freinage. Ainsi, un effort est créé dans les bras du motocycliste en faisant varier la distance entre la selle et le guidon. Le second retour d'effort a pour but de restituer le couple résultant du contact pneu-chaussée sur l'axe de direction de la moto.

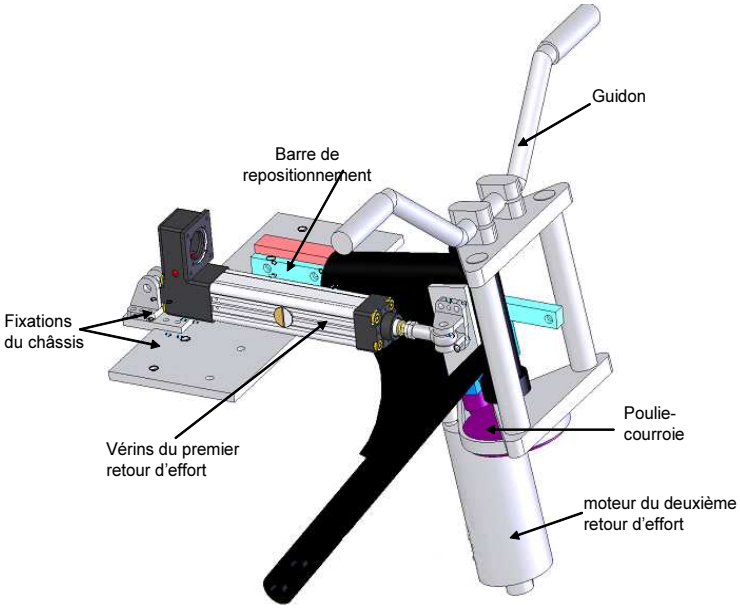

FIGURE 8.24 – *Le système à double retour d'effort du guidon*

La position des différents axes de rotation est d'une grande importance. A notre connaissance, aucune étude psychophysique n'a été menée, sauf dans quelques cas très

particuliers [226]. Par conséquent, ces axes sont définis à partir de la cinématique d'une moto réelle. Afin de simuler un lacet nécessaire pour reproduire un dérapage de la roue arrière, un système de glissière est fixé à l'arrière du bâti du simulateur [20, 21].

8.4.2 Aspects de modélisation et identification

8.4.2.1 Modèle géométrique inverse

La géométrie inverse consiste à définir les coordonnées articulaires des différents actionneurs, qui sont dans notre cas les élongations des deux vérins avant et le déplacement linéaire de la glissière arrière, en fonction des coordonnées cartésiennes et de l'orientation de la plate-forme mobile. En dérivant ces deux ensembles de coordonnées par rapport au temps, on peut déduire une matrice de transformation dite jacobienne inverse.

La plate-forme mécanique du présent simulateur peut être perçue comme une architecture parallèle constituée d'un bâti fixe et d'une partie mobile comprenant le châssis de la moto. On définit un repère inertiel $\Re(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ lié au bâti et un deuxième repère $\Re_m(O_m, \mathbf{i}_m, \mathbf{j}_m, \mathbf{k}_m)$ lié à la moto (Figure 8.25). Les points B_1, B_2 et B_3 sont respectivement les points d'attaches des deux vérins avant et du support de la glissière arrière avec le bâti de la plate-forme. Les points P_1, P_2 et P_3 sont respectivement les points d'attaches supérieurs des deux vérins avant et de la glissière arrière avec la plate-forme mobile, dont les positions, exprimées dans le repère mobile, sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{O_m P_1}^m &= \begin{bmatrix} 0 & l & 0 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{O_m P_2}^m &= \begin{bmatrix} 0 & -l & 0 \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{O_m P_3}^m &= \begin{bmatrix} -l_3 & 0 & -h_3 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{8.33}$$

Il a été choisi de représenté l'orientation du repère mobile $\Re_m$ par rapport au repère fixe $\Re$ par les angles d'Euler (ψ, θ, φ) suivant la convention ZYX (lacet-tangage-roulis). La matrice de rotation $\mathcal{R}$ définissant l'orientation du repère $\Re_m$ par rapport au repère $\Re$ s'écrit donc en fonction de ces angles, comme suit :

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi s\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi \\ c\theta s\psi & s\varphi s\theta s\psi + c\varphi c\psi & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi \\ -s\theta & s\varphi c\theta & c\varphi c\theta \end{pmatrix} \tag{8.34}$$

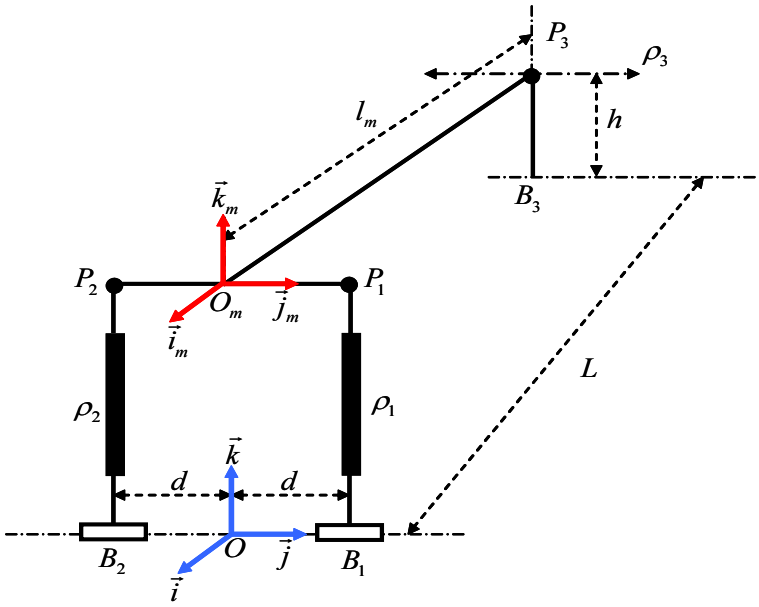

FIGURE 8.25 – *Description cinématique de la plate-forme*

La partie supérieure mobile du simulateur est représentée, par rapport au repère fixe $\Re$, par six variables : les 3 coordonnées cartésiennes (x_m,y_m,z_m) de l'origine O_m du repère $\Re_m$ et les trois angles d'Euler (ψ,θ,φ). Une liaison mécanique est introduite afin d'assurer la symétrie entre les déplacements des points B_1 et B_2. Par conséquent, le déplacement transversal de O_m le long de l'axe **j** est nul.

Le vecteur $\mathbf{OP_3}$ dans le repère fixe $\Re$ s'écrit :

$$\mathbf{OP_3} = \mathbf{OO_m} + \mathcal{R}\mathbf{O_mP_3}^m \tag{8.35}$$

D'où l'expression algébrique :

$$\begin{bmatrix} -L \\ \rho_3 \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \mathcal{R} \begin{bmatrix} -l_3 \\ 0 \\ -h_3 \end{bmatrix} \tag{8.36}$$

Ainsi, on obtient la relation entre les coordonnées cartésiennes de l'origine O_m et les angles d'orientation de la plate-forme mobile. De plus, sachant que $y_m = 0$, on déduit directement la variable articulaire ρ_3, de déplacement linéaire de la glissière arrière, comme suit :

$$\begin{cases} x_m = -L + l_3 r_{11} + h_3 r_{13} \\ \rho_3 = -l_3 r_{21} - h_3 r_{23} \\ z_m = h + l_3 r_{31} + h_3 r_{33} \end{cases} \tag{8.37}$$

où r_{ij} sont les éléments de la matrice de rotation $\mathcal{R}$. L'équation 8.37, exprimant les contraintes géométriques, montre que les deux ensembles (position et orientation du repère mobile $\Re_m$) sont dépendants l'un de l'autre. On peut donc utiliser l'une des deux représentations pour exprimer la cinématique et la dynamique de la plate-forme.

A présent, il ne reste qu'à trouver les deux variables articulaires des deux vérins avant ρ_1 et ρ_2 qui définissent la longueur totale de chaque vérin en fonction de l'orientation

de la partie supérieure mobile. Ces deux quantités sont données par le produit scalaire $\rho_i^2 = \mathbf{B_iP_i}.\mathbf{B_iP_i}$, avec :

$$\mathbf{B_iP_i} = \mathbf{B_iO} + \mathbf{OO_m} + \mathcal{R}\mathbf{O_mP_i}^m \tag{8.38}$$

Enfin, si on note d le déplacement des deux point B_1 et B_2, le vecteur $\mathbf{B_iO}$ peut être exprimé par $\mathbf{B_iO} = (-1)^i d\mathbf{j}$. Sachant que la composante y du vecteur $\mathbf{B_iP_i}$ est nulle, cette dernière équation permet d'écrire :

$$d = r_{22}l \tag{8.39}$$

8.4.2.2 Cinématique inverse de la plate-forme

L'objectif de cette partie est la synthèse de l'expression des vitesses articulaires en fonction du torseur cinématique de la plate-forme mobile. Dans une architecture à 6DDL, le torseur cinématique $\mathbf{W}$ de la plate-forme par rapport au bâti, exprimé au point O_m origine de repère $\Re_m$, s'écrit comme suit :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{O}}\mathbf{O_m} \\ \Omega \end{bmatrix} \tag{8.40}$$

La vitesse articulaire $\dot{\rho}_i$ des deux vérins avant est calculée par la projection du vecteur vitesse $\mathbf{B_i\dot{P}_i}$ dans la direction du vérin définie par le vecteur unitaire $\mathbf{u_i} = \mathbf{B_iP_i}/\rho_i$:

$$\dot{\rho}_i = \mathbf{B_i\dot{P}_iu_i} \tag{8.41}$$

En dérivant l'équation 8.38 par rapport au temps, on obtient :

$$\mathbf{B_i\dot{P}_i} = \mathbf{B_i\dot{O}} + \mathbf{O\dot{O}_m} + \Omega \times \mathcal{R}\mathbf{O_mP_i}^m \tag{8.42}$$

Où Ω est la vitesse angulaire de la plate-forme mobile. Le passage entre le repère $\Re$ et le repère $\Re_m$ est défini par les trois rotations successives suivantes :

- La rotation du lacet ψ autour de $\mathbf{k}$ permet d'obtenir le repère $\Re_1(O, \mathbf{i_1}, \mathbf{j_1}, \mathbf{k_1})$,
- La rotation du tangage θ autour de $\mathbf{j_1}$ permet d'obtenir le repère $\Re_2(O, \mathbf{i_2}, \mathbf{j_2}, \mathbf{k_2})$,
- La rotation du roulis φ autour de $\mathbf{i_2}$ permet d'obtenir le repère $\Re_m(O_m, \mathbf{i_m}, \mathbf{j_m}, \mathbf{k_m})$

alors, Ω est donnée par la formule suivante :

$$\Omega = \dot{\psi}\mathbf{k} + \dot{\theta}\mathbf{j_1} + \dot{\varphi}\mathbf{i_2} \tag{8.43}$$

La projection des vecteurs $\mathbf{j_1}$ et $\mathbf{i_2}$ dans le repère global $\Re$ permet de déduire une matrice de transformation $\mathcal{E}$ qui lie la vitesse angulaire Ω au vecteur des dérivées des angles d'Euler $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}]$ par la relation :

$$\Omega = \mathcal{E}\dot{\mathbf{q}}$$

Où :

$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} 0 & -s\psi & c\theta c\psi \\ 0 & c\psi & c\theta s\psi \\ 1 & 0 & -s\theta \end{pmatrix} \tag{8.44}$$

DDL	Tangage	Roulis	Lacet
Rotation max	10°	72°	10°
Vitesse angulaire max	$30^\circ/s$	$360^\circ/s$	$90^\circ/s$

TABLE 8.1 – *Caractéristiques cinématiques de l'espace de travail du simulateur deux-roues*

Enfin, la vitesse articulaire $\dot{\rho}_3$ s'obtient par la projection du vecteur vitesse $\mathbf{\dot{OP_3}}$ sur le vecteur unitaire $\mathbf{j}$, donc :

$$\dot{\rho}_3 = \mathbf{O\dot{O}_m j} + (\mathcal{R}\mathbf{O_m P_3} \times \mathbf{j})\Omega \tag{8.45}$$

8.4.2.3 Matrice jacobienne inverse

La matrice jacobienne entre deux ensembles de variables, écrites d'une manière explicite sous la forme $\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$, s'obtient par la différentiation suivante :

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}(t))\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathcal{J}_{y,x}\dot{\mathbf{x}}(t) \tag{8.46}$$

Dans le cas d'une plate-forme mécanique parallèle, la matrice jacobienne inverse permet de transformer le torseur cinématique $\mathbf{W}$ vers les vitesses articulaires $\dot{\rho}_i$. En remplaçant l'équation 8.26 dans 8.41, on peut écrire :

$$\dot{\rho}_i = \mathbf{\dot{B_i O u_i}} + \mathbf{O\dot{O}_m u_i} + (\Omega \times \mathcal{R}\mathbf{O_m P_i}^m)\mathbf{u_i} \tag{8.47}$$

Si $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ et $\mathbf{c}$ sont trois vecteurs donnés, les équivalences suivantes sont vraies (propriété du produit mixte) :

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b})\mathbf{c} = (\mathbf{c} \times \mathbf{a})\mathbf{b} = (\mathbf{b} \times \mathbf{c})\mathbf{a} \tag{8.48}$$

Appliquée à l'équation 8.47, et sachant que les deux vecteurs $\mathbf{\dot{B_i O}}$ et $\mathbf{u_i}$ sont, par construction de la plate-forme, orthogonaux, on obtient l'expression suivante :

$$\dot{\rho}_i = \mathbf{O\dot{O}_m u_i} + (\mathcal{R}\mathbf{O_m P_i}^m \times \mathbf{u_i})\Omega \tag{8.49}$$

Enfin, à partir des équations 8.45 et 8.49 nous pouvons formuler une écriture algébrique de la matrice jacobienne inverse J_{-1} comme :

$$\mathbf{V}_\rho = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{u_1}^T & (\mathbf{RO_m P_1}^m \times \mathbf{u_1})^T \\ \mathbf{u_2}^T & (\mathbf{RO_m P_2}^m \times \mathbf{u_2})^T \\ \mathbf{j}^T & (\mathbf{RO_m P_3}^m \times \mathbf{j})^T \end{bmatrix}}_{\mathcal{J}_{-1}} \mathbf{W} \tag{8.50}$$

Avec, $\mathbf{V}_\rho = [\dot{\rho}_1, \dot{\rho}_2, \dot{\rho}_3]$ est le vecteur des vitesses articulaires.

8.4.2.4 Modélisation dynamique de la plate-forme

Le modèle dynamique d'un système mécanique traduit par des équations algébro-différentielles les relations existantes entre les variables de configuration de la plate-forme, leurs dérivées et dérivées secondes, ainsi que les efforts extérieurs agissant sur le système.

Après avoir évalué la contribution dynamique de chaque vérin, il est nécessaire d'appliquer le principe de Newton-Euler afin d'établir un modèle dynamique de l'ensemble. Le torseur des efforts extérieurs exprimé au point O_m est donné par :

– action de la tige T_i $(i = 1, 2)$ sur la moto :

$$\Gamma_{T_i/m} = \left\{ \begin{array}{c} -\mathbf{F}_s \\ -\mathbf{O_m P_i} \times \mathbf{F_s} \end{array} \right\}_{O_m} \tag{8.51}$$

– action de la glissière P_3 sur la moto :

$$\Gamma_{P_3/m} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{F_3} \\ \mathbf{O_m P_3} \times \mathbf{F_3} \end{array} \right\}_{O_m} \tag{8.52}$$

L'application du principe de Newton-Euler nous permet d'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\mathbf{F_{s1}} - \mathbf{F_{s2}} + \mathbf{F_3} + m_p \mathbf{g} = m_p \ddot{\mathbf{OG_p}} \\ -\mathbf{O_m P_1} \times \mathbf{F_{s1}} - \mathbf{O_m P_2} \times \mathbf{F_{s2}} + \mathbf{O_m P_3} \times \mathbf{F_3} + m_p \mathbf{O_m G_p} \times \mathbf{g} = \\ m_p \mathbf{O_m G_p} \times \ddot{\mathbf{OG_p}} + \Im_\mathbf{p} \dot{\Omega} + \Omega \times \Im_\mathbf{p} \Omega \end{array} \right. \tag{8.53}$$

où m_p et $\Im_\mathbf{p}$ sont la masse et la matrice d'inertie de la plate-forme mobile exprimée dans le repère global. G_p dénote le centre d'inertie, où son accélération $\ddot{\mathbf{OG}}_p$ par rapport au point O est calculée de la manière suivante :

$$\ddot{\mathbf{OG}}_p = \ddot{\mathbf{OO}}_m + \dot{\Omega} \times \mathbf{O_m G}_p + \Omega \times (\Omega \times \mathbf{O_m G}_p) \tag{8.54}$$

En posant $\alpha_G = \left[\begin{array}{cc} \mathbf{I_3} & -\widetilde{\mathbf{O_m G_p}} \end{array} \right]$, la dernière équation s'écrit en fonction du torseur cinématique $\mathbf{W}$:

$$\ddot{\mathbf{OG}}_p = \alpha_G \dot{\mathbf{W}} + \widetilde{\Omega}^2 \mathbf{O_m G}_p \tag{8.55}$$

Donc, en remplaçant le vecteur $\mathbf{F_s}$ par son expression dans le système d'équations dynamiques 8.53 et posant $\mathbf{F_3} = F_3 \mathbf{j}$, on obtient l'équation du modèle dynamique de la plate-forme :

$$\mathcal{M}\dot{\mathbf{W}} + \mathbf{C} + \mathbf{G}_g = \mathcal{J}_{-1}^T \mathbf{F} \tag{8.56}$$

où $\mathcal{J}_{-1}$ est la matrice jacobienne inverse. Le vecteur $\mathbf{F} = \left[\begin{array}{ccc} F_1 & F_2 & F_3 \end{array} \right]^T$ est celui des forces d'actionnement. La matrice de masse $\mathcal{M}$, le vecteur d'élément non-linéaire appelé de Coriolis $\mathbf{C}$ et $\mathbf{G}_g$ est le vecteur des termes dus à la gravité. Les expressions détaillées de tous les termes peuvent être consultés dans [27].

En pratique, l'utilisation du modèle dynamique décrit par l'équation 8.56, pour réaliser une quelconque commande, n'est pas très convivial à cause de la complexité des calculs et des fortes non-linéarités. Il est important de considérer un modèle plus simplifié en négligeant la dynamique apportée par les deux vérins avant. Dans ce cas, l'équation qui exprime le vecteur F_s des forces dans la liaison rotule devient :

$$\mathbf{F_s} = -F\mathbf{u} \tag{8.57}$$

Donc, la force $\mathbf{F_s}$ se réduit aux forces d'actionnement F le long de l'axe du vérin. En remplaçant cette dernière formule dans la dynamique de la plate-forme mobile définie

par l'équation 8.53, on obtient une version simplifiée de la dynamique de la plate-forme du simulateur :

$$\mathcal{M}\dot{\mathbf{W}} + \mathbf{C} + \mathbf{G}_g = \mathcal{J}_{-1}^T \mathbf{F} \tag{8.58}$$

Où la matrice $\mathcal{M}$ est la matrice de masse qui dépend seulement de l'orientation de la plate-forme mobile. Le vecteur de Coriolis $\mathbf{C}$ contient des éléments non-linéaires et dépend de l'orientation et de la vitesse angulaire de la plate-forme mobile. $\mathbf{G_g}$ est le vecteur qui contient les éléments liés à la gravité. Ces quantités sont exprimées par les équations suivantes :

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} m_p \mathcal{I}_3 & -m_p \widetilde{\mathbf{O_m G_p}} \\ m_p \widetilde{\mathbf{O_m G_p}} & \Im_{\mathbf{p}} - m_p \widetilde{\mathbf{O_m G_p}}^2 \end{bmatrix} \tag{8.59}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} m_p \widetilde{\Omega}^2 \mathbf{O_m G_p} \\ \widetilde{\Omega} \Im_{\mathbf{p}} \Omega + m_p \widetilde{\mathbf{O_m G_p}} \widetilde{\Omega}^2 \mathbf{O_m G_p} \end{bmatrix} \tag{8.60}$$

et

$$\mathbf{G}_g = -m_p \begin{bmatrix} \mathcal{I}_3 \\ \widetilde{\mathbf{O_m G_p}} \end{bmatrix} \mathbf{g} \tag{8.61}$$

Cependant, la présente plate-forme mécanique dispose seulement de 3DDL indépendants. Il est essentiel d'introduire l'équation algébrique des contraintes. En remplaçant les éléments r_{ij} de la matrice de rotation $\mathcal{R}$ par leurs expressions, l'équation géométrique des contraintes $\Phi(\mathbf{q}, t) = 0$ devient :

$$\Phi(q,t) = \begin{cases} x_m + L - l_3 c\theta c\psi - h_3(c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi) = 0 \\ y_m = 0 \\ z_m - h + l_3 s\theta - h3 c\varphi c\theta = 0 \end{cases} \tag{8.62}$$

La dérivation de cette formule par rapport au temps permet de déduire la jacobienne Φ_q de la matrice des contraintes qui lie la dérivée de $\Phi(\mathbf{q}, t)$ au torseur cinématique $\mathbf{W}$. Cette jacobienne est donnée par la formule suivante :

$$\Phi_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 c\theta s\psi + h_3(c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi) & l_3 s\theta c\psi - h_3 c\varphi c\theta c\psi & h_3 s\varphi s\theta c\psi - h_3 c\varphi s\psi \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_3 c\theta + h_3 c\varphi s\theta & h_3 s\varphi c\theta \end{bmatrix} \tag{8.63}$$

D'un autre côté, il est intéressant de réduire le nombre de variables à intégrer. Pour cela, nous allons écrire le modèle dynamique dans l'espace des variables articulaires. Le torseur cinématique $\mathbf{W}$ est lié au vecteur des vitesses articulaires $\mathbf{V}_\rho$ par la matrice jacobienne $\mathcal{J}_{-1}$, par conséquent :

$$\mathbf{V}_\rho = \mathcal{J}_{-1}\mathbf{W} \Rightarrow \dot{\mathbf{W}} = \dot{\mathcal{J}}_{-1}^{-1}\mathbf{V}_\rho + \mathcal{J}_{-1}^{-1}\dot{\mathbf{V}}_\rho \tag{8.64}$$

où $\dot{\mathbf{V}}_\rho = [\ddot{\rho}_1, \ddot{\rho}_2, \ddot{\rho}_3]$ est le vecteur des accélérations articulaires et $\dot{\mathcal{J}}_{-1}^{-1}$ est l'inverse de la dérivée de la matrice jacobienne par rapport au temps et qui peut être calculée par $\dot{\mathcal{J}}_{-1}^{-1} = -\mathcal{J}_{-1}^{-1}\dot{\mathcal{J}}_{-1}\mathcal{J}_{-1}^{-1}$. Enfin, l'équation dynamique devient :

$$\mathcal{M}'\dot{\mathbf{V}}_\rho + \mathbf{C}' + \mathbf{G}_g + \Phi_q^T \Lambda = \mathcal{J}_{-1}^T \mathbf{F} \tag{8.65}$$

où la matrice de masse devient $\mathcal{M}' = \mathcal{M}\mathcal{J}_{-1}^{-1}$ et le vecteur de Coriolis $\mathbf{C}' = \mathbf{C} - \mathcal{M}\mathcal{J}_{-1}^{-1}\dot{\mathcal{J}}_{-1}\mathcal{J}_{-1}^{-1}\dot{\mathbf{V}}$. Λ est le vecteur des multiplicateurs de Lagrange. Il interprète l'ensemble des efforts internes correspondant aux forces/couples nécessaires pour contraindre les mouvements relatifs définis par la mécanique de la plate-forme.

8.4.2.5 Identification

Le modèle dynamique décrit par l'équation 8.65 est paramétré par un ensemble de données, comme la position du centre d'inertie, masse, matrice d'inertie, etc. L'identification de ces paramètres est d'une importance cruciale dans la caractérisation fréquentielle du simulateur et le bon contrôle des actionneurs.

La première étape consiste à réécrire l'expression de la dynamique sous une forme linéaire, par rapport aux paramètres physiques à estimer, adaptée au processus d'identification [228]. Il est à noter que le vecteur des multiplicateurs de Lagrange dans l'équation 8.65 est une quantité inconnue. De ce point de vue, il est nécessaire d'éliminer ce vecteur de l'expression de la dynamique de la plate-forme et de ne laisser que les couples moteurs, directement mesurés à partir des variateurs. En intégrant le couple τ_f lié aux termes de frottements sec et visqueux, l'équation du mouvement est :

$$\begin{cases} \mathcal{M}\dot{\mathbf{W}} + \mathbf{C} + \mathbf{G}_g + \Phi_q^T \Lambda = \mathcal{J}_{-1}^T \mathbf{F} - \tau_f \\ \Phi_q \dot{\mathbf{W}} + \mathbf{Q_c} = 0 \end{cases} \tag{8.66}$$

Le torseur cinématique $\mathbf{W}$ contient six variables de coordonnées dont seulement trois sont indépendantes. Dans la suite, on considère que les variables de coordonnées indépendantes sont les trois rotations correspondant aux mouvements de tangage, de roulis et de lacet. De ce fait, le torseur cinématique peut être scindé en deux ensembles représentants les vecteurs de coordonnées dépendantes $\mathbf{q_d}$ et indépendantes $\mathbf{q_i}$ [229], comme suit :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_\mathbf{d} \\ \dot{\mathbf{q}}_\mathbf{i} \end{bmatrix} \tag{8.67}$$

En suivant le même raisonnement, la matrice jacobienne liée aux contraintes géométriques Φ_q est partitionnée en deux parties suivant le vecteur des coordonnées dépendantes et indépendantes par l'équation suivante :

$$\Phi_q = \begin{bmatrix} \mathcal{A}_d & \mathcal{A}_i \end{bmatrix} \tag{8.68}$$

En remplaçant les deux dernières formules dans l'équation de 8.66, nous pouvons écrire le vecteur des accélérations $\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{d}$ exprimées en fonctions des coordonnées indépendantes, par :

$$\ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{d} = -\mathcal{A}_d^{-1}(\mathcal{A}_i \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{i} - \mathbf{Q_c}) \tag{8.69}$$

Enfin, rapporter cette expression dans l'équation de la dynamique 8.66, et multiplier les deux membres de l'équation résultante par la matrice $\mathcal{B}_m^T$, nous permet d'éliminer le vecteur des multiplicateurs de Lagrange. Ainsi, on obtient :

m_p	I_1	I_2	I_3
75.98 kg	19.32kg.m^2	4.69 kg.m^2	0.956kg.m^2
X_g	Y_g	Z_g	
-34.92 cm	-1.07 cm	-18.93 cm	
frottement sec vérins	frottement visqueux vérins	frottement sec glissière	frottement visqueux glissière
0.1738 N.m	0.1425 N.s/m	0.0564 N.m	0.0487 N.s/m

TABLE 8.2 – *Estimations des paramètres inertiels et de frottements*

$$\mathcal{B}_m^T \mathcal{M} \mathcal{B}_m \ddot{\mathbf{q}}_\mathbf{i} + \mathcal{B}_m^T(\mathcal{M}\mathbf{B_c} + \mathbf{C} + \mathbf{G_g}) + \underbrace{\mathcal{B}_m^T \Phi_q^T}_{\mathbf{0_{3\times1}}} \Lambda = \mathcal{B}_m^T(\mathcal{J}_{-1}^T \mathbf{F} - \tau_f) \tag{8.70}$$

Où, $\mathcal{B}_m = \begin{bmatrix} -\mathcal{A}_d^{-1}\mathcal{A}_i \\ \mathcal{I}_3 \end{bmatrix}$, et $\mathbf{B_c} = \begin{bmatrix} \mathcal{A}_d^{-1}\mathbf{Q_c} \\ \mathbf{0_{3\times1}} \end{bmatrix}$.

Dans la littérature, diverses approches d'identification ont été développées. Elles sont généralement fondées sur des méthodes d'optimisation et de régression linéaire (méthode des moindres carrés, optimisations adaptatives, etc.). Nous avons choisi une méthode adaptative à descente de gradient du fait de sa simplicité d'implémentation en-ligne ou hors-ligne [230]. Cette technique consiste à minimiser un critère quadratique $\mathbf{J} = 1/2(\mathbf{F}_{ref} - \mathbf{F})^2$ entre les forces moteurs mesurées, $\mathbf{F}_{ref}$ et calculées $\mathbf{F}$. Cette minimisation revient à résoudre, à chaque pas de temps, l'équation différentielle suivante :

$$\dot{\mathbf{p}} = -\mathcal{P}\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{P}} \tag{8.71}$$

Où $\mathcal{P}$ est une matrice diagonale dont les coefficients sont appelés "pas d'adaptation" jouant un rôle primordial dans la rapidité de la convergence de cet algorithme [231].

Les paramètres physiques identifiés sont résumés dans le tableau, [25, 20].

Le diagramme de Bode (Figure 8.26) est réalisé en identifiant une fonction de transfert, moyennant la "toolbox identification" de Matlab ©. Cette fonction de transfert représente la dynamique du vérin en boucle fermée. Elle est donnée par l'expression :

$$\frac{\rho_{1,2}}{\rho_{ref}} = \frac{3.64s + 3.49}{0.0127s^3 + 0.3702s^2 + 5.034s + 4.49} \tag{8.72}$$

et pour le système de déplacement de la glissière arrière, on obtient aussi :

$$\frac{\rho_3}{\rho_{ref}} = \frac{27.73s + 11.48}{s(0.01893s^2 + 2.446s + 1)} \tag{8.73}$$

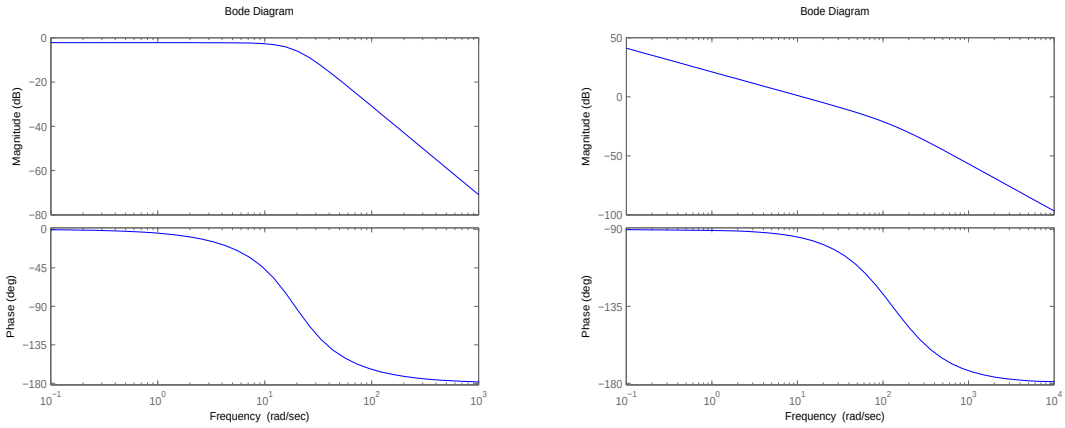

FIGURE 8.26 – *Tracés de Bode des fonctions de transfert*

La bande passante des deux systèmes (vérins et glissière) en boucle fermée à -3db est respectivement $11.8 rad/sec$ et $17.2 rad/sec$, autrement dit, $1{,}91 Hz$ et $2.73 Hz$. Comparée à 3-4 Hz de la dynamique réelle des véhicules deux-roues, on conclue que la plate-forme du simulateur a des caractéristiques limitées pour la restitution des accélérations transitoires rapides (freinage d'urgence, accélération brusque, ...). Cette limitation n'est toutefois pas rédhibitoire dans la mesure où la simulation de conduite repose sur la génération d'illusions et non sur le rendu de mouvements physiques réels. Les caractéristiques précises nécessaires pour produire ces illusions ne sont pas complètement connues, en particulier, pour un simulateur de deux-roues. Toutefois, on peut penser que les caractéristiques dynamiques actuelles de la plate-forme développée nous permettent de stimuler de manière suffisante le conducteur. Mais, seule une expérimentation psychophysique doit permettre de valider que cette dynamique est appropriée.

8.4.3 Adaptation des ARM aux simulateurs deux-roues

A l'exception de l'algorithme prédictif, les différentes approches des ARM, exposées dans les sections précédentes, sont développées pour les simulateurs de vol. Toutefois, leur adaptation à la simulation de conduite automobile et deux-roues est possible en prenant en compte la dynamique, le contenu spectral des manœuvres et la variabilité de l'environnement de conduite.

Les accélérations linéaires et les vitesses angulaires d'un véhicule, mesurées par une centrale inertielle ou calculées par le modèle du véhicule virtuel, sont généralement exprimées dans le repère local. Or, la cohérence des indices à reproduire par la plate-forme mobile, nous impose d'exprimer toutes les variables d'entrée du bloc ARM à un endroit défini sur le véhicule virtuel et à son homologue sur le simulateur physique. Nous avons choisi le point d'assise sur le siège du conducteur, seul point physique commun entre le véhicule réel et la plate-forme du simulateur.

A partir de ces considérations, nous pouvons établir un schéma simple pour la restitution du mouvement, comme suit :

- La dynamique de la moto virtuelle est élaborée dans un repère où son origine est la projection du centre de masse sur la chaussée.

- Le tangage ne sera pas rendu par un ARM. Il sera utilisé pour amplifier l'effet de la suspension (plongée de la fourche).
- Pour éviter une éventuelle chute du conducteur, seules les composantes HF de l'accélération sont restituées.
- Le style de conduite n'est pas considéré vu l'absence d'un capteur permettant la mesure de l'inclinaison du buste du conducteur.

8.4.4 Tests expérimentaux en boucle ouverte

L'objectif des tests en boucle ouverte est d'évaluer la réponse de l'ensemble des sous systèmes par le biais trois manœuvres de base, à savoir, une conduite en ligne droite, un changement de voie et une prise de virage. Celles-ci sont réalisées sans introduire le conducteur dans la boucle de simulation.

8.4.4.1 Conduite en ligne droite

Cette manœuvre est la base de la conduite en file donc le conducteur est en charge du contrôle de la vitesse pour une conduite dans un environnement de trafic urbain. Elle constitue une problématique majeure même pour des plates-formes munies d'un déplacement linéaire conséquent.

Dans cette expérimentation, les différentes actions du conducteur sont mesurées et enregistrées afin de calculer l'accélération et la vitesse longitudinale de la moto virtuelle (Figure 8.27). Ensuite, les variables articulaires sont déterminées pour actionner la plate-forme afin d'évaluer ses performances cinématiques et dynamiques. La figure 8.28 présente l'accélération réelle telle que calculée par le modèle véhicule virtuel et l'accélération restituée utilisant l'algorithme d'émulation HF. Néanmoins, ce tracé permet de ne fournir qu'une idée sur les performances de cette plate-forme à restituer une accélération longitudinale.

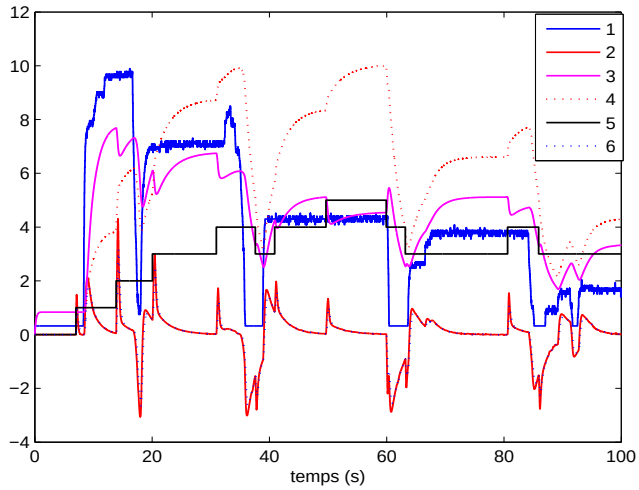

FIGURE 8.27 – *1 : ouverture gaz (× 10%), 2 : accélération longitudinale (m/s²), 3 : régime moteur (× 1000rpm), 4 : vitesse longitudinale (m/s), 5 : rapport boite de vitesse, 6 : angle de tangage (°)*

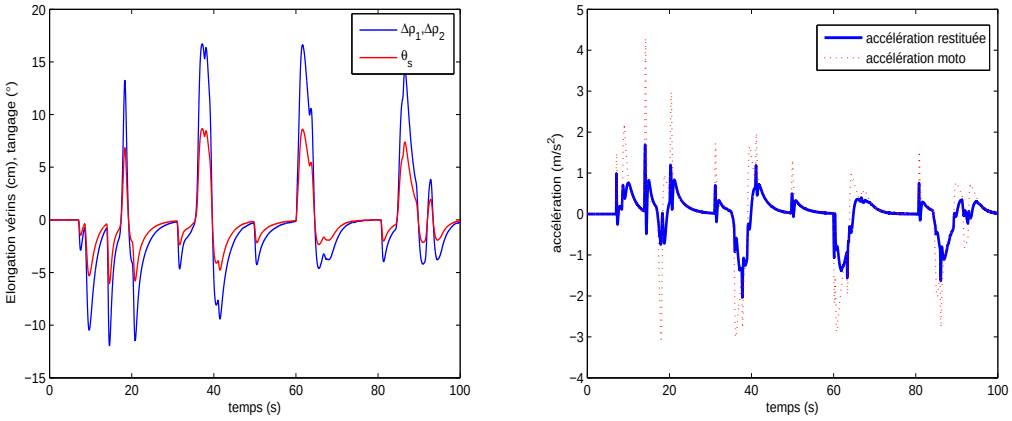

FIGURE 8.28 – *(a) Elongation vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ et angle de tangage simulateur θ_s, (b) Accélération longitudinale réelle et accélération restituée*

8.4.5 Changement de voie et prise de virage

Des manœuvres de changement de voie et de prise de virage sont essentielles pour évaluer la capacité du simulateur à reproduire une partie de la dynamique latérale lors de la conduite d'un deux-roues. Lors de ces tests, un contrôleur de pilotage du modèle virtuel de la moto permettant de déterminer le couple conducteur τ est nécessaire. Une manière simple de réaliser le suivi de l'angle du roulis désiré peut être effectué par un régulateur Proportionnel-Dérivé, comme suit :

$$\tau = K_p(\varphi_d - \varphi) + K_d\dot{\varphi} \tag{8.74}$$

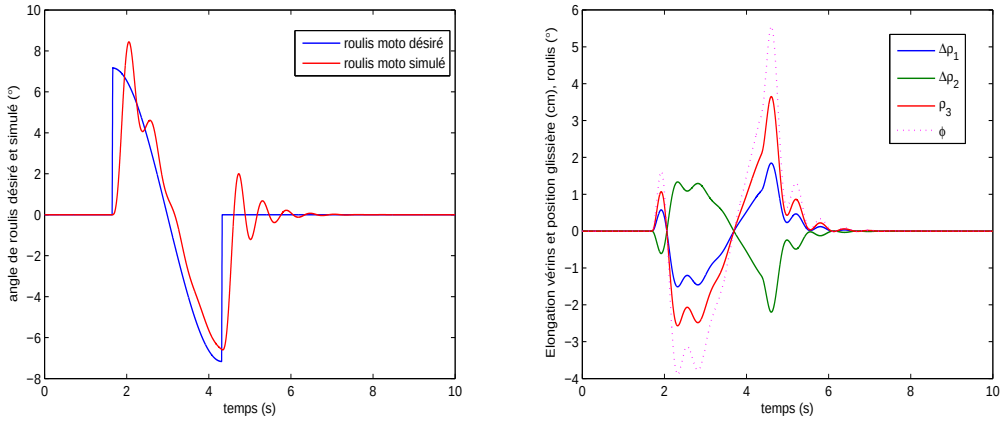

FIGURE 8.29 – *Changement de voie : (a) Angle de roulis désiré et simulé par le modèle virtuel de la moto, (b) Elongation des vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, position de la glissière ρ_3 et angle de roulis du simulateur φ_s*

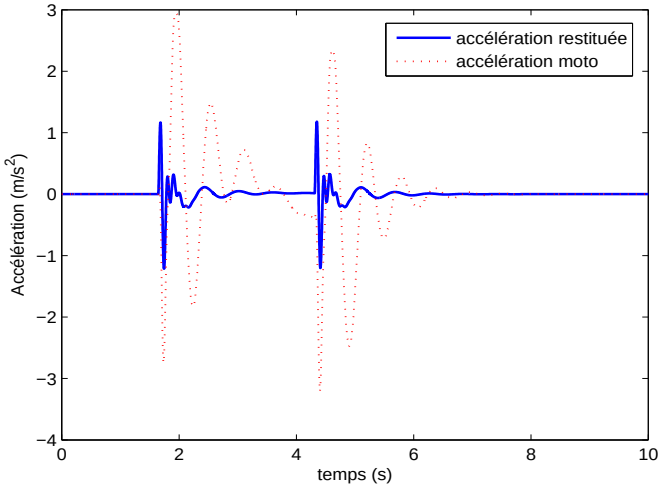

FIGURE 8.30 – *Changement de voie : accélération latérale réelle et accélération restituée*

Les figures 8.29 et 8.30 illustrent les différentes variables mises en jeu dans une manœuvre de changement de voie d'une largeur de $4m$ et d'une longueur de $20m$ avec une vitesse longitudinale de $15m/s$. De la même manière, les figures 8.31 et 8.32 représentent les mêmes variables pour une manœuvre de prise d'un virage de $50m$ de rayon, toujours à une vitesse longitudinale de $15m/s$.

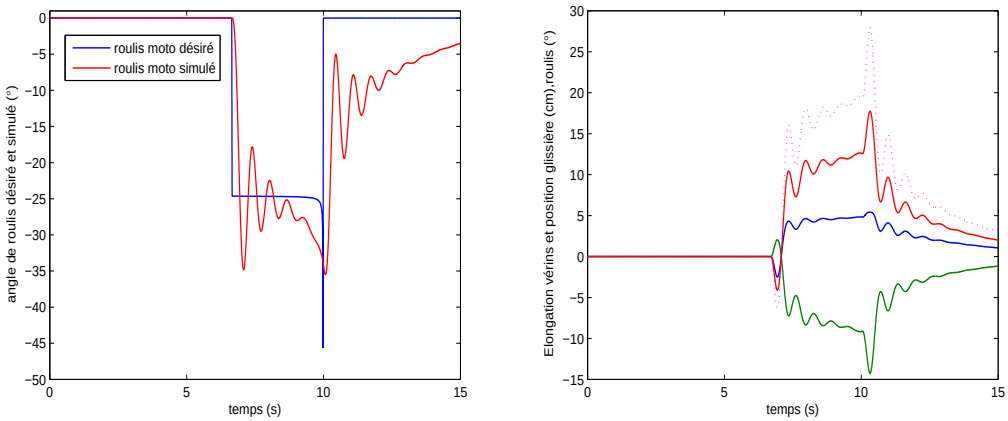

FIGURE 8.31 – *Prise de virage : (a) Angle de roulis désiré et simulé par le modèle virtuel de la moto, (b) Elongation vérins avant $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, position de la glissière ρ_3 et angle du roulis simulateur φ_s*

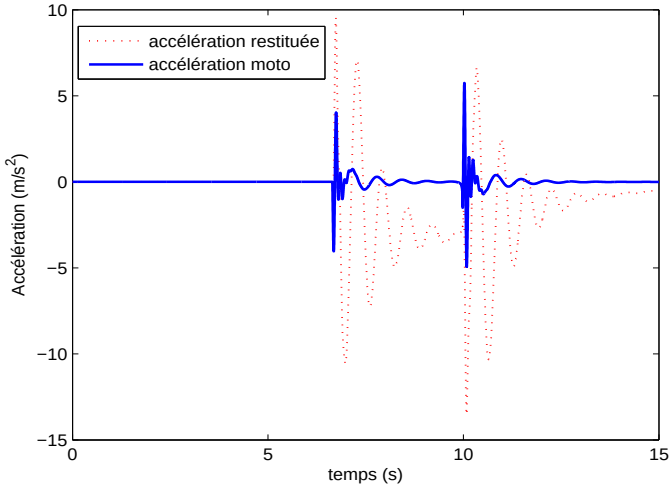

FIGURE 8.32 – *Prise de virage : accélération latérale réelle et accélération restituée*

8.4.6 Discussion

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence quelques *carences* de cette plateforme. Afin de les contourner, quelques travaux futurs devraient être poursuivis.

- L'amélioration du ressenti de la dynamique moto passe obligatoirement par la bonne connaissance de la consigne conducteur, en l'occurrence, le couple conducteur. Or, aucun capteur n'est installé sur le présent simulateur.
- Le système du double retour d'effort sur le guidon est original. Son impact sur la conduite devrait améliorer sensiblement le ressenti dans les phases d'accélération/décélération.
- Les tests en boucle fermée (avec conducteur) permettraient des conclusions sur les améliorations à envisager.
- L'ajout de nouveaux étages de mouvements, par exemple longitudinal, sur la plateforme s'avère essentiel au détriment d'un coût simulateur plus élevé.
- Le simulateur constitue une excellente base d'essais d'algorithmes pour l'assistance à la conduite et l'implantation de systèmes d'alertes.
- L'étude de l'impact de la position et des mouvements du conducteur (inclinaison, bassin) sur la contrôlabilité de la moto constitue une voie de recherche intéressante.

FIGURE 8.33 – *La première version du simulateur*

8.5 CONCLUSIONS

Un simulateur de conduite est un système global où l'ensemble des restitutions visuelles, sonores et vibratoires concourent, avec les aspects dynamiques, à la qualité de simulation. Un bon simulateur de conduite à plate-forme mobile est caractérisé généralement par sa capacité à créer des stimuli perceptifs proches des situations de conduite réelles et non par la reproduction fidèle des effets inertiels.

L'intérêt des simulateurs de conduite pour la formation et pour l'étude des comportements de conduite est évident. Les caractéristiques/architectures des simulateurs sont décrits essentiellement par leurs usages/applications auxquels il est dédié. Du point de vue architecture de communication, les caractéristiques sont définies de façon à optimiser l'impact des bruits (une communication numérique est beaucoup plus avantageuse) ainsi que le respect des contraintes temps-réel et à réduire les temps de retard éventuels.

En se basant sur les modalités perceptives impliquées dans le contrôle de véhicules en situation de conduite, nous avons mis en place trois plates-formes mobiles à faible coût, toutes munies de dispositifs à retour haptique aidant, d'une part, à l'amélioration de la présence au sein des environnements de synthèse et d'autre part, à l'opération de conduite.

Les simulateurs de conduite "auto" que nous avons développés se sont avérés très utiles, d'un côté, pour la restitution de mouvements (accélération/freinage) sur de très faibles distances et de l'autre, pour l'étude de composantes dynamiques spécifiques (retour d'effort sur le volant, mouvement de lacet, etc.) sur la qualité du ressenti lors de la conduite. Nous avons aussi implémenté / développé plusieurs algorithmes de restitution de mouvements afin d'étudier l'adéquation de ces derniers avec les plates-formes à bas coût (espace de travail généralement réduit). Dans le même contexte, nous avons proposé une méthode analytique aidant au choix des paramètres des différents filtres washout classiques, jusque là synthétisés par essais-erreurs. Il est à noter, qu'il est inutile de synthétiser des commandes robustes ou autres ayant des performances dynamiques

supérieures mais qui restent incapable de transcrire un mouvement compréhensible par le système vestibulaire.

Les deux prototypes de simulation de conduite automobile constituent les premières plates-formes "low-cost" proposées au niveau national. Le premier prototype a été dupliqué plusieurs fois au profit de laboratoires de recherche et autres institutions.

Concernant le simulateur de conduite de véhicules deux roues, l'ambition était d'aboutir à un simulateur moto original permettant la formation aux manœuvres d'urgence de type freinage et évitement. Cet objectif n'est encore pas atteint. Néanmoins, ce prototype à 5DDL, mis au point dans le cadre du projet ANR-PREDIT SIMACOM, est un des plus avancé dans le monde. Il a d'ailleurs été dupliqué pour un centre de recherche grec.

La complexité du simulateur est peut être suffisante mais de nombreux travaux restent à accomplir afin d'atteindre une solution acceptable qui devra, in fine, être validée par des experts et par des comparaisons avec le "terrain". Une thèse en cotutelle avec le LCPC LEPSIS porte sur l'affinage des modèles dynamiques "moto" et sur l'automatisation de la conduite "moto" devrait permettre de faire progresser la connaissance en permettant d'étudier des situations reproductibles, et d'affiner le simulateur existant.

De manière générale, la simulation de conduite sur deux roues est infiniment plus complexe que la simulation de conduite automobile. Les raisons sont multiples, on peut noter : un contrôle permanent de l'équilibre du véhicule par le pilote, le mode de prise de virage (annulation de la force centrifuge par inclinaison du véhicule), la dynamique du véhicule (les accélérations, sur les premiers mètres sont supérieures à celles des automobiles de compétition, et ce même pour des cylindrées moyennes), mais aussi le contact direct du conducteur avec les éléments extérieurs (vent, froid, pluie).

Ces éléments nous ont permis de comprendre de nombreux phénomènes et les limitations d'un simulateur de conduite à reproduire en partie une dynamique nécessaire pour la conduite de deux-roues. Cette plate-forme constitue donc une excellente opportunité afin de poursuivre les travaux de recherche et de servir en tant que plate-forme d'essais, par exemple pour le test des systèmes d'alertes déjà abordés dans le chapitre précédent.

Dans le même contexte de la simulation de conduite, nous avons amorcé le développement d'une architecture de restitution de mouvements pour les fauteuils roulants. Cette plate-forme est nécessaire pour des problèmes liés à l'accessibilité, au choix de fauteuil, à l'évaluation de la capacité de conduite d'une personne à mobilité réduite, etc.

Conclusion générale et perspectives

Au terme de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches, un premier bilan s'impose : afin de mieux cerner les applications centrées humain, un chercheur doit justifier de connaissances pluridisciplinaires où seules les aspects commande et modélisation ne sont pas suffisants. Une vision globale de ces systèmes doit être envisagée avant toute conception ou commande des systèmes afférents à ces applications. Cette démarche nous a apporté une ouverture, certes à enrichir, vers plusieurs partenaires scientifiques et organismes de recherche.

Après avoir inscrit ces applications dans une politique de recherche pluridisciplinaire, nous avons dégagé des orientations de recherche qui ont ouvert plusieurs problèmes fondamentaux. Les solutions proposées pour traiter certains de ces problèmes sont brièvement présentées dans ce mémoire. Outres ces aspects de recherche fondamentale, plusieurs passages de ce mémoire témoignent de ma volonté d'inscrire, chaque fois que cela est possible, les développements théoriques dans le cadre d'applications concrètes.

Durant ces sept années de recherche, amorcées par la commande des interfaces à retour haptique, je me suis attaqué, dans un premier temps, aux problématiques relatives à la simulation de conduite. La ressemblance entre ces deux axes de recherche, interaction haptique et simulation de conduite, peut se faire sur plusieurs points : (1) l'élément central reste l'homme, (2) la stimulation par le biais de rendu sensorielle (mouvement, effort et vision) et (3) l'immersion dans un environnement de synthèse, etc.

Récemment, un axe de recherche, en lien avec les simulateurs de conduite, s'est dérivé. Il concerne l'étude des véhicules de deux roues. Le besoin a été dicté, d'une part, par le faible nombre de travaux de recherche sur les aspects de modélisation, sécurité routière, automatisation voire infrastructure et d'autre part, par l'intérêt croissant des pouvoirs publics dû au taux de mortalité élevé comparé aux usagers des véhicules de tourisme. Dans ce cadre, je pense qu'il reste encore beaucoup à apprendre de la dynamique des véhicules de deux-roues, mais aussi des interactions avec l'infrastructure et le conducteur. Notre démarche de recherche s'efforce toujours de tenir compte de ces trois composantes aussi bien dans les étapes de conception que dans les étapes de test et d'évaluation.

Dans ce contexte, les travaux de recherche sur les véhicules de deux-roues n'ont pas atteint la même maturité que celle dont jouissent les véhicules automobiles. Il est nécessaire de s'investir fortement dans cet axe, notamment sur les aspects de modélisation, d'observation, de commande/stabilisation et d'assistance au conducteur par le biais systèmes de sécurité (sous forme d'alertes préventive ou retour actifs). La réalisation d'une fonction active de sécurité sur des véhicules évoluant dans un environnement difficile nécessite aussi de développer des moyens de perception (capteurs : électroniques ou observateurs). Dans ce cadre, le chercheur devra nécessairement tenir compte lors des étapes de conception de cette architecture de capteur et de la dynamique associée. Une démarche

similaire a été lancée en collaboration avec des partenaires spécialisés afin de mettre en place un véhicule deux roues automatisé. Cette dernière plateforme devrait être un excellent Benchmark pour : 1) tester des différentes commandes de stabilisation et de suivi de trajectoires, 2) installer des systèmes de sécurité actives et quantifier leur impact lors de la conduite, etc.

Par ailleurs, et concernant les interactions haptiques, l'innovation dans ce domaine s'est limitée aux nouveaux mécanismes de rendu d'effort et aux applications aux quelles ils sont dédiés. Plusieurs applications ont vues le jour s'appuyant sur cette modalité haptique. Nous nous sommes intéressés récemment à la téléopération des robots mobiles. Bien que la tâche semble facile, il est très difficile de contrôler ces robots en présence de retard de communication constant. La difficulté est accrue en la présence des fluctuations de retard. Nous avons adapté et testé quelques schémas de commande, mais l'intuitivité du contrôle s'affaibli avec un retard plus grand ou plus variable. La réponse à ces problèmes afférents au retard de communication ouvrirait la porte au travail collaboratif et faciliterait de manière considérable l'apprentissage et l'exécution des tâches difficiles.

Finalement, un ou plusieurs points communs aux activités de recherche que je mène depuis le début résident dans l'utilité sociétale. En effet, faciliter l'apprentissage ou sécuriser la route/ le véhicule pour les usagers rendrait service à l'homme, considéré comme l'anneau central de toutes ces applications.

Ainsi, le programme de recherche que je me suis fixé s'inscrit dans la continuité des travaux que j'ai initiés avec mes collaborateurs. J'en ai regroupé les grandes lignes ci-après.

- Observation des états dynamiques (glissement latéral, forces de contact, etc.) des véhicules à deux roues. Les modèles dynamiques de ces systèmes sont plus complexes que ceux de la voiture de tourisme et ils sont caractérisés par de fortes non-linéarités.
- Contrôle actif à basse vitesse des véhicules à deux roues plongés dans des milieux urbains complexes.
- Mise en place de dispositif de rendu de mouvements, "simulateur" compact assurant une présence lors de la conduite, fidèle à la réalité.
- Mener les réflexions au niveau national et/ou fédérer un groupe de travail sur la sécurité routière autour des véhicules de deux-roues.
- Amorcer des collaborations avec la communauté des "télécommunications" et le traitement de signal pour répondre aux exigences d'une collaboration haptique distribuée stable et transparente.

Je ne prétends pas pouvoir donner, à moyen terme, une solution à tous les problèmes que révèleront les diverses étapes pour atteindre ces objectifs. Cependant je suis très motivé pour aller le plus loin possible en mettant en œuvre les moyens nécessaires, en suscitant l'intérêt d'autres collaborateurs, en prenant en compte les orientations futures de la recherche européenne, les besoins technologiques industriels, les enjeux en termes de maîtrise que posent des systèmes de plus en plus complexes, les besoins en communications, bref les besoins de la société du futur.

Modèle dynamique linéaire d'un véhicule deux roues

A

Modèle dynamique de Sharp 71

- ***Equation du mouvement latéral*** **:**

$$(M_f + M_r)\ddot{y}_1 + M_f k\ddot{\psi} + (M_f j + M_r h)\ddot{\varphi} + M_f e\ddot{\delta} + (M_f + M_r)u\dot{\psi} - Y_f - Y_r = 0 \tag{A.1}$$

- ***Equation du mouvement de lacet*** **:**

$$\begin{aligned} &M_f k\ddot{y}_1 + (M_f k^2 + I_{rz} + I_{fx}\sin^2\epsilon + I_{fz}\cos^2\epsilon)\ddot{\psi} + (M_f jk - C_{rxz} + (I_{fz} - I_{fx})\sin\epsilon\cos\epsilon)\ddot{\varphi} \\ &+(M_f ek + I_{fz}\cos\epsilon)\ddot{\delta} + M_f ku\dot{\psi} - i_{fy}/R_f \sin\epsilon u\dot{\delta} - (i_{fy}/R_f + i_{ry}/R_r)u\dot{\varphi} - lY_f + bY_r = 0 \end{aligned} \tag{A.2}$$

- ***Equation du mouvement de roulis*** **:**

$$\begin{aligned} &(M_f j + M_r h)\ddot{y}_1 + (M_f jk - C_{rxz} + (I_{fz} - I_{fx})\sin\epsilon\cos\epsilon)\ddot{\psi} + \\ &(M_f j^2 + M_r h^2 + I_{rx} + I_{fx}\cos^2\epsilon + I_{fz}\sin^2\epsilon)\ddot{\varphi} + (M_f ej + I_{fz}\sin\epsilon)\ddot{\delta} + \\ &(M_f j + M_r h + i_{fy}/R_f + i_{ry}/R_r)u\dot{\psi} + i_{fy}/R_f\cos\epsilon u\dot{\delta} - (M_f h + M_r h)g\varphi + (tZ_f - M_f eg)\delta = 0 \end{aligned} \tag{A.3}$$

- ***Equation du système de direction*** **:**

$$\begin{aligned} &M_f e\ddot{y}_1 + (M_f ek + I_{fz}\cos\epsilon)\ddot{\psi} + (M_f ej + I_{fz}\sin\epsilon)\ddot{\varphi} + (I_{fz} + M_f e^2)\ddot{\delta} + (M_f e + i_{fy}/R_f\sin\epsilon)u\dot{\psi} \\ &-i_{fy}/R_f\cos\epsilon u\dot{\varphi} + K\dot{\delta} + (tZ_f - M_f eg)\sin\epsilon\delta + (tZ_f - M_f eg)\varphi + tY_f = \tau \end{aligned} \tag{A.4}$$

- ***Equation de la force de glissement latéral de la roue avant*** **:**

$$\frac{\sigma_f}{u}\dot{Y}_f + Y_f = C_{f1}\left(\delta\cos\epsilon - \frac{\dot{y}_1 + l\dot{\psi} - t\dot{\delta}}{u}\right) + C_{f2}(\varphi + \delta\sin\epsilon) \tag{A.5}$$

- ***Equation de la force de glissement latéral de la roue arrière*** **:**

$$\frac{\sigma_r}{u}\dot{Y}_r + Y_r = C_{r1}\left(\frac{b\dot{\psi} - \dot{y}_1}{u}\right) + C_{r2}\varphi \tag{A.6}$$

Ces équations peuvent être rassemblées sous un systèmes d'équations différentielles à intégrer, comme suit :

$$\dot{\mathcal{X}} = \mathbf{A}\mathcal{X} + \mathbf{B}\tau \tag{A.7}$$

où $\mathcal{X} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & \dot{\psi} & \dot{\varphi} & \dot{\delta} & \varphi & \delta & Y_f & Y_r \end{bmatrix}^T$ est le vecteur d'état.

Bibliographie

[1] J. Salisbury and M. Srinivasan., "Phantom-based haptic interaction with virtual objects," *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 6–10, September/October 1997. (Cité pages xii, 68 et 71.)

[2] J. Colgate and G. Schenkel, "Passivity of class of sampled data systems : Application to haptic interfaces," in *IEEE Virtual Reality Annual Internationnal Symposium*, 1994. Seattle. (Cité pages xii et 72.)

[3] S. Glaser, *Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoire limites Application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. Thèse de Doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, 2004. (Cité pages xiv et 147.)

[4] M. Johansson and J. Nordin, "A survey of driving simulators and their suitability for testing volvo cars," *Master Thesis*, 2002. (Cité pages xiv et 168.)

[5] S. Espie, "Possibilité d'utilisation d'un simulateur de conduite pour des études approfondies sur le comportement du conducteur," *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'00)*, pp. 87–96, 2000. (Cité pages xiv et 168.)

[6] H. Arioui, S. Mammar, and T. Hamel, "A smith-prediction based haptic feedback controller for time delayed virtual environments systems," in *American Control Conference (ACC'02)*, pp. 4303–4308, 2002. (Cité page 13.)

[7] H. Arioui, A. Kheddar, and S. Mammar, "A model based controller for interactive force reflecting virtual environment under time delay," *Journal of Intelligent and Robotic Systems -Theory and Applications-*, vol. 37, pp. 193–207, June 2003. (Cité pages 13, 15 et 81.)

[8] H. Arioui, A. Kheddar, and S. Mammar, "A predictive wave-based approach for time delayed virtual environment haptics systems," in 11th *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN'02)*, pp. 552–556, IEEE ROMAN, 2002. (Cité pages 13, 15 et 93.)

[9] H. Arioui, M. Mana, A. Kheddar, and S. Mammar, "Stable shared virtual environment haptic interaction under time-varying delay," in 17th *IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC'02)*, pp. 896–901, 2002. (Cité pages 13, 40, 41 et 89.)

[10] A. Kheddar, "Téléopération basée sur le concept du robot caché," *Thèse Doctorat, LRP, France*, 1997. (Cité pages 14 et 65.)

[11] H. Arioui, "Impact des réseaux de communication sur la perception haptique en réalité virtuelle," in *Mécanismes du contrôle de la qualité ; de service : applications temps réel*

et multimédia (A. Mellouk, ed.), Paris : Edition Hermès, 2008. ISBN 9782746214880. (Cité pages 15, 16, 17, 79 et 102.)

[12] H. Arioui, A. Kheddar, and S. Mammar, "A robustness analysis of master-model based controller for stabilizing delayed haptic interaction : An lmi approach," in 11th *International Conference on Advanced Robotics (ICAR'03)*, pp. 1449–1455, 2003. (Cité pages 15 et 86.)

[13] H. Arioui, "Effect of transmission delay on haptic perception in shared virtual environments," in *End-to-End Quality of Service Engineering in Next Generation Heterogeneous Networks* (A. Mellouk, ed.), pp. 435–448, Paris : Edition Hermès, 2008. (Cité pages 16, 79 et 102.)

[14] K. Tourbah, H. Arioui, N. Seguy, and A. Kheddar, "Collaborative haptic simulation," in *IEEE Conference on Control Application (ICCA'06)*, pp. 187–192, 2006. (Cité pages 16, 17, 39, 101 et 105.)

[15] H. Arioui and P. Hoppenot, "Force feedback stabilization for remote control of an assistive mobile robot," in *Soumis à American Control Conference, San Francisco, California, USA, June 29 - July 1*, 2011. (Cité pages 17 et 94.)

[16] H. Arioui and P. Hoppenot, "Remote control of an assistive robot using force feedback," in *Soumis à 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), EPFL, Lausanne, Switzerland, February 6 - 8, 2011*, 2011. (Cité pages 18 et 94.)

[17] H. Mohellebi, S. Espie, H. Arioui, A. Amouri, and A. Kheddar, "Low cost motion platform for driving simulator," in 5th *International Conference on Machine Automation, (ICMA'04)*, pp. 271–277, 2004. (Cité pages 19, 27, 36, 42 et 172.)

[18] L. Nehaoua, H. Arioui, N. Seguy, and S. Espie, "Open-loop tests and validation of a new two-wheeled vehicle riding simulator," in *European Control Conference (ECC'07)*, pp. 4911–4916, 2007. (Cité pages 19, 27 et 35.)

[19] L. Nehaoua, H. Arioui, N. Seguy, and S. Espie, "Design and modeling of a new motorcycle riding simulator," in *American Control Conference (ACC'07)*, pp. 176–181, 2007. (Cité pages 19, 27, 35 et 41.)

[20] H. Arioui, L. Nehaoua, S. Hima, N. Séguy, and S. Espié, "Mechatronics, design and modeling of a motorcycle riding simulator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, pp. 805–818, October 2010. (Cité pages 19, 20, 27, 32, 35, 197 et 204.)

[21] L. Nehaoua, H. Arioui, S. Hima, and N. Seguy, "A new motorcycle simulator platform : Mechatronics design, dynamics modeling and control," in 17th *IFAC World Congress 2008, Seoul, South of Korea*, pp. 4452–4457, 2008. (Cité pages 19, 32, 35, 41 et 197.)

[22] L. Nehaoua, H. Mohellebi, H. Arioui, A. Kheddar, and S. Espie, "Design and control of a minimum-clearance driving simulator," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, pp. 736–746, March 2008. (Cité pages 19, 20, 21, 27, 35, 36, 172 et 185.)

[23] L. Nehaoua, H. Arioui, H. Mohellebi, and S. Espie, "Motion cueing algorithms for small driving simulator," in *International Conference on Robotics and Automation (ICRA'06)*, pp. 3189–3194, 2006. (Cité pages 19, 20, 27, 35, 36 et 185.)

[24] H. Arioui, L. Nehaoua, S. Hima, R. Bertin, and S. Espie, "From design to experiments of a 2 dof vehicle driving simulator," *A apparaître dans IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 99, 2011. (Cité pages 20, 21, 27, 32, 35, 180 et 192.)

[25] L. Nehaoua and H. Arioui, "Parameters identification for motorcycle simulator's platform characterization," in 1st *Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA'08), 30 Juin - 02 Juillet, Annaba, Algérie*, pp. 133–138, 2008. (Cité pages 20, 35 et 204.)

[26] M. Saidi, A. Debbeh, H. Arioui, and H. A. Abbassi, "Predictive control of motion platform in driving simulator," *Journal of Information Technology*, vol. 5, pp. 133–138, June 2006. (Cité pages 20, 28 et 37.)

[27] L. Nehaoua, "Conception et réalisation d'une plateforme mécatronique dédiée à la simulation de conduite des véhicules deux-roues motorisés," *Thèse Doctorat, Université d'Evry, France*, 2008. (Cité pages 21 et 201.)

[28] R. Sharp, "The stability and control of motorcycles," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 13, pp. 316–329, 1971. (Cité pages 23, 113, 125 et 143.)

[29] R. Sharp and D. Limbeer, "A motorcycle model for stability and control analysis," *Multibody System Dynamics*, vol. 6, pp. 123–142, 2001. Kluwer Academic Publishers. (Cité pages 23 et 113.)

[30] S. Hima, L. Nehaoua, N. Seguy, and H. Arioui, "Suitable two wheeled vehicle dynamics synthesis for interactive motorcycle simulator," in 17th *IFAC World Congress 2008, Seoul, South of Korea*, pp. 96–101, 2008. (Cité pages 23, 32, 35 et 134.)

[31] S. Hima, L. Nehaoua, N. Seguy, and H. Arioui, "Motorcycle dynamic model synthesis for two wheeled driving simulator," in 10th *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'07)*, pp. 812–817, 2007. (Cité pages 23, 35 et 134.)

[32] L. Nehaoua, H. Arioui, A. Khettat, H. Imine, and S. Espié, "Rider steer torque estimation for motorcycle riding simulator," in 5th *IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Cambridge, Massachusetts, USA, September 13-15*, pp. 505–510, 2010. (Cité pages 24, 27, 33 et 158.)

[33] H. Slimi, H. Arioui, and S. Mammar, "Advanced motorcycle-infrastructure-driver roll angle profile for loss control prevention," in 12th *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'09), St. Louis, USA, October 4-7*, pp. 492–497, 2009. (Cité pages 24, 34, 133, 143 et 149.)

[34] H. Slimi, H. Arioui, and S. Mammar, "Preventive safety : Warning system for control loss of two-wheeled vehicles," in 2nd *Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation 2009 (CISA'09), Djerba, Tunisia, March 23-25*, pp. 47–52, 2009. (Cité pages 24, 34 et 41.)

[35] H. Slimi, H. Arioui, L. Nouvelière, and S. Mammar, "Motorcycle speed profile in cornering situation," in *American Control Conference (ACC'10), Baltimore, Maryland, USA, 30 June - 02 July*, pp. 1172–1177, 2010. (Cité pages 24, 34, 133, 134, 143, 152 et 155.)

[36] "Intelligent systems and automation : 1st mediterranean conference on intelligent systems and automation (cisa'08)," (40, rue du Pelvoux, 91020, Evry, France), 2008. (Cité pages 27 et 28.)

[37] H. Mohellebi, S. Espié, A. Kheddar, and H. Arioui, "Design of low-clearance motion platform for driving simulator," in *Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era* (E. Science and T. Books, eds.), 2006. ISBN 9780080449630. (Cité pages 27 et 36.)

[38] L. Nehaoua, H. Arioui, H. Mohellebi, and S. Espie, "Restitution movement for a low cost driving simulator," in *American Control Conference (ACC'06)*, pp. 2599–2604, 2006. (Cité pages 27, 35, 36 et 186.)

[39] A. Merabet and H. Arioui, "Cascaded predictive controller design for speed control and load torque rejection of induction motor," in *American Control Conference (ACC'08), 11-13 June, Seattle, WA, USA*, pp. 1139 – 1144, 2008. (Cité page 28.)

[40] A. Merabet and H. Arioui, "Robust cascaded feedback linearizing control of non-holonomic mobile robot," in *IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'10), May 2-5, 2010, Calgary, Alberta, Canada.*, 2010. (Cité page 28.)

[41] S. Hima and H. Arioui, "Two wheeled vehicle dynamics synthesis for real-time applications," in 1st *Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA'08)*, pp. 47–52, 2008. (Cité page 32.)

[42] H. Arioui, S. Hima, and L. Nehaoua, "2 dof low cost platform for driving simulator : Design and modeling," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'09), Singapore, July 14-17*, pp. 1206–1211, 2009. (Cité pages 32, 35, 41, 173, 178 et 181.)

[43] H. Arioui, S. Hima, and L. Nehaoua, "Modeling and identification of 2 dof low cost driving simulator : Experimental results," in 18th *IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'09), Toyama, Japan, Septembre 27 - Octobre 2*, pp. 1162–1167, 2009. (Cité pages 32, 35, 41, 173, 178 et 181.)

[44] H. Slimi, H. Arioui, S. Mammar, and L. Nouvelière, "Système de génération d'alertes pour la perte de contrôle de véhicules à deux roues motorisés," in *Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'09), Sologne, France, Novembre 3-6*, 2009. (Cité pages 34, 41 et 158.)

[45] H. Arioui, L. Nehaoua, and A. Amouri, "Classic and adaptive washout comparison for a low cost driving simulator," in 13th *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'05)*, pp. 356–361, 2005. (Cité pages 35 et 172.)

[46] H. Arioui, "Téléopération avec retour d'effort en présence de retard de transmission : commande et analyse de stabilité," in *14ème Journées Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'01), Evry, France, 31 Mai - 01 Juin*, pp. 48–53, 2001. (Cité page 41.)

[47] H. Arioui, "Haptic interaction : Progress and challenge," in *Papier invité à International Conference on Control Modelling and Diagnostic (ICCMD'06), Annaba, Algérie, 22-24 May*, 2006. (Cité pages 41 et 42.)

[48] H. Arioui, "Stabilisation d'un système de téléopération en présence de retard de transmission par des méthodes prédictives," in *Journées Systèmes à Retard (SAR'04, GDR MACS), Paris, France, 18 March*, 2004. (Cité page 41.)

[49] H. Arioui, "Réalité virtuelle et rendu haptique," in *Séminaire interne de Genopole-Recherche, Evry, France, 25 Mars*, 2005. (Cité page 41.)

[50] G. Burdea and P. Coiffet, "Virtual reality technology," John Wiley, 1994. (Cité page 65.)

[51] T. Massie and J. Salisbury, "The PHANToM haptic interfaces : A device for probing virtual objects," in *ASME International Mechanical Engineering Congress Exhibition*, pp. 217–225, 1994. Chicago, IL. (Cité pages 68 et 89.)

[52] R. Adams and B. Hannaford, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, pp. 465–474, June 1999. (Cité pages 69, 74 et 75.)

[53] T. Brooks and A. Bejczy, "Hand controllers for teleoperation, a state of the art : technology survey and evaluation," *Report no. 85-11, Jet Propulsion Laboratory, NASA*, 1985. (Cité page 70.)

[54] F. Gosselin, "Développement d'outils d'aide à la conception d'organes de commande pour la téléopération à retour d'effort," *Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 21 juin 2000*, 2000. (Cité page 70.)

[55] R. Ellis, O. Ismaeil, and M. Lipsett, "Design and evaluation of a high-performance haptic interface," *Robotica*, vol. 4, 1996. (Cité page 70.)

[56] M. Feldmann, *Théorie des réseaux et systèmes linéaires*. Technique et Scientifique des Télécommunications, Eyrolles, Paris, 1986. (Cité pages 71 et 75.)

[57] E. Bolinder, "Survey of some properties of linear networks," *IRE Transactions On Circuit Theory*, pp. 70–78, 1957. (Cité page 71.)

[58] R. Anderson, "A network approach to force control in robotics and teleoperation," *Phd thesis, Electrical Engineering, University of Illinois, Urbana*, 1989. (Cité page 71.)

[59] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthisic feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 426–434, August 1989. (Cité page 71.)

[60] C. Andriot, "Automatique des systèmes maître-esclave avec retour d'effort," *Thèse de doctorat, Université de Paris 6*, 1992. (Cité page 71.)

[61] T. Brooks, "Telerobotic response requirements," in *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC'90)*, pp. 113–120, 1990. (Cité page 72.)

[62] P. Coiffet and A. Kheddar, *Téléopération et télérobotique*. Collection IC2, Hermès - Lavoisier, Paris, 2002. ISBN 9782746227873. (Cité page 72.)

[63] L. Penin, F. M., J. Fernandez-Pello, R. Aracil, and A. Barrientos, "Design fundamentals of master-slave systems with a force-position bilateral control scheme," in *Fifth IFAC Symposium of Robot Control, Nantes, France*, pp. 631–638, 1997. (Cité page 73.)

[64] H. Das, H. Zak, W. Kim, A. Bejczy, and P. Shenker, "Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation," *Presence*, vol. 1, no. 2, pp. 201–218, 1992. (Cité page 73.)

[65] G. Ferretti, G. Magnani, and P. Rocco, "On the stability of integral force control in case of contact with stiff surfaces," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 117, pp. 547–553, 1995. (Cité page 73.)

[66] R. Daniel and P. Mcarre, "Fundamental limits of performance for force reflecting teleoperation," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 17, pp. 811–830, 1998. (Cité page 73.)

[67] D. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib, "The haptic display of complex graphical environments," in *ACM SIGGRAPH 97*, pp. 345–352, 1997. (Cité page 74.)

[68] L. Colgate, M. Stanley, and J. Brown, "Issues in the haptic display of tool use," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS'95)*, pp. 140–145, 1995. Pittsburgh, PA. (Cité page 74.)

[69] K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda, and M. Otsuba, "Tele-manipulation system based on task-oriented virtual tool," in *IEEE International Conference on Robotic and Automation (ICRA'95), Nagoya, Japan*, pp. 351–356, 1995. (Cité page 74.)

[70] C. Andriot and L. Joly, "Imposing Motion Constraints to a Force Reflecting Telerobot through Real-Time Simulation of Virtual Mechanism," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'95)*, (Nagoya, Japan), pp. 357–362, 1995. (Cité page 74.)

[71] K. Kaneko, H. Tokashiki, K. Tanie, and K. Komoriya, "Impedance shaping based on force feedback bilateral control in macro-micro teleoperation system," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97), Albuquerque, USA*, pp. 710–717, 1997. (Cité page 75.)

[72] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of masre-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling - formulation and experiment," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 605–620, 1994. (Cité page 75.)

[73] C. Carignan and K. Cleary, "Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environment," *Haptics-e*, vol. 1, no. 2, pp. 1–13, 2000. (Cité page 75.)

[74] R. Anderson, "Building a modular robot control system using passivity and scattering theory," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'96), Minneapolis, Minnesota, USA*, pp. 698–705, 1996. (Cité page 75.)

[75] J. Willems, "Dissipative dynamical systems – part 1 : General theory," *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol. 45, no. 5, pp. 321–351, 1972. (Cité page 76.)

[76] C. Byrnes, A. Isidori, and J. Willems, "Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 11, pp. 1228–1240, 1991. (Cité page 76.)

[77] B. Hannaford and J. Ryu, "Time domain passivity control of haptic interfaces," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 18, pp. 1–10, February 2002. (Cité pages 76 et 79.)

[78] F. Llewellyn, "Some fundamental properties of transmission systems," in *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 40, pp. 271–283, 1952. (Cité pages 76 et 81.)

[79] B. Miller, J. Colgate, and R. Freeman, "Computational delay and free mode environment design for haptic display," *ASME Dynnamic Systems and Control Division*, 1999. (Cité page 76.)

[80] B. Miller, J. Colgate, and R. Freeman, "Passive implementation for a class of static nonlinear environments in haptic display," in *IEEE International Conference on Robotics an Automation (ICRA'99)*, May 1999. Detroit, Michigan. (Cité page 76.)

[81] H. Tokashiki, P. Akella, and K. Tanie, "Scaled bilateral telemanipulation : an experimental investigation of scaling laws," in *SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies*, pp. 214–224, 1994. (Cité page 76.)

[82] P. Buttolo, R. Oboe, and B. Hannaford, "Architectures for shared haptic virtual environments," *Computers and Graphics*, vol. 21, pp. 421–429, July-Aug 1997. (Cité pages 77 et 102.)

[83] J. Wilson, Kline-Schoder, M. Kenton, and N. Hogan, "Algorithms for network-based force feedback," *Fourth PHANTOM Users Group Workshop*, 1999. RLE Technical Report No. 633. (Cité pages 77 et 101.)

[84] C. Basdogan, C. Ho, M. Srinivasan, and M. Slater, "An experimental study on the role of touch in shared virtual environments," in *ACM Human Computer Interaction*, 2000. (Cité page 77.)

[85] W. Ferrel, "Remote manipulation with transmission delay," *IEEE Transaction on Human Factors in Electronics*, vol. 6, pp. 24–32, 1965. (Cité page 77.)

[86] R. Anderson and M. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, pp. 494–501, May 1989. (Cité page 77.)

[87] G. Leung and B. Francis, "Bilateral control of teleoperators with time delay through a digital communication channel," in *30th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Monticello, IL,*, pp. 629–701, 1992. (Cité page 77.)

[88] G. Niemeyer and J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, pp. 152–162, 1991. (Cité page 77.)

[89] D. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 624–637, 1993. (Cité page 77.)

[90] S. Lee and H. Lee, "Modeling, design, and evaluation of advanced teleoperator control systems with short time delay," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 607–623, 1993. (Cité page 78.)

[91] T. Yoshikawa and J. Ueda, "Analysis and control of master-slave systems with time delay," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Inelligent Robots and Systems (IROS'96)*, pp. 1366–1373, 1996. (Cité page 78.)

[92] J. Alvarez-Gellegos, D. Rodriguez, and M. Spong, "A stable control scheme for teleoperators with time delay," *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 73–78, 1997. (Cité page 78.)

[93] S. Stramigioli, A. V. der Schaft, and B. Maschke, "Geometric Scattering in telemanipulation of port controlled Hamiltonian systems," in *IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*, 2000. Sydney, Australia. (Cité page 78.)

[94] H. Cho, J. Park, K. Kim, and J. Park, "Sliding-mode-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay," in *nternational Conference Robotics and Automation (ICRA'01)*, (Seoul, Korea), pp. 1025–1030, May, 21-26 2001. (Cité page 78.)

[95] J. Park and H. Cho, "Sliding mode control of bilateral teleoperation systems with force-reflecting on the internet," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'00)*, 2000. (Cité page 78.)

[96] G. Leung, B. Francis, and J. Apkarian, "Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ-Synthesis," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'95)*, vol. 11, pp. 105–116, February 1995. (Cité page 78.)

[97] M. Jun and M. Safonov, "Stability analysis of a system with time-delayed states," in *American Control Conference (ACC'00), Chicago, Illinois.*, pp. 949–952, June 2000. (Cité page 78.)

[98] M. Noyes and S. T., "A novel predictor for telemanipulation through a time delay," in *Annual Conference on Manual Control, Moffett Field, CA, Nasa Ames Research Center*, 1984. (Cité page 78.)

[99] A. Bejczy, K. W., and V. S., "The phantom robot : predictive displays for teleoperation with time delay," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'90)*, pp. 546–551, 1990. (Cité page 78.)

[100] J. Funda, L. T., and P. R., "Teleprogramming : Towards delay-invariant remote manipulation," *Presence. Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press*, vol. 1, no. 1, pp. 24–44, 1992. (Cité page 78.)

[101] G. Hirzinger, "Sensor-based space robotics rotex and its telerobotic features," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 649–663, 1993. (Cité page 78.)

[102] O. Smith, "A Controller to overcome dead time," *ISA Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 28–33, 1959. (Cité pages 78 et 79.)

[103] H. Kobayashi, J. Tatsuno, S. Ito, and S. Matsuyama, "Tele-operation through network with random time delay," in *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RoMAN'95)*, pp. 49–52, 1995. (Cité page 78.)

[104] K. Kosuge and H. Murayama, "Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS'96)*, pp. 1380–1385, Novembre 1996. (Cité page 79.)

[105] G. Niemeyer and J. Slotine, "Towards force-Reflecting Teleoperation over the Internet," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'98)*, pp. 1909–1915, May 1998. Leuven, Belgium. (Cité page 79.)

[106] Y. Yokokojhi, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral teleoperation uner time-varying communication delay," in *IEEE/RSJ International Conference Inelligent Robots and Systems (IROS'99)*, pp. 1854–1859, 1999. (Cité page 79.)

[107] Y. Yokokojhi, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'00)*, pp. 2434–2439, April 2000. San Francisco, CA. (Cité page 79.)

[108] P. Buckley, "Automatic control of processes with dead time," in *Proc. First Iternational Congress IFAC*, pp. 33–40, 1960. (Cité page 79.)

[109] A. Fuller, "Optimal nonlinear control of systems with pure delay," *International Journal of Control*, vol. 8, no. 2, pp. 145–168, 1968. (Cité pages 79 et 80.)

[110] A. Manitius and W. Olbrot, "Finite spectrum assignment problem for systems with delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-24, pp. 541–553, August 1979. (Cité pages 79 et 80.)

[111] K. Watanabe and M. Ito, "A Process-Model Control for Linear System with Delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-26, pp. 1261–1268, December 1981. (Cité pages 79 et 80.)

[112] S. Mondié, M. Dambrine, and O. Santos, "Approximation of control laws with distributed delays : a necessary condition for stability," in *IFAC Conference on Systems, Structure and Control*, August 2001. Prague, Czech Republic. (Cité page 80.)

[113] A. V. der Schaft, *L_2-Gain an Passivity Techniques in Nonlinear Control*. New Yrok : Springer, 1996. ISBN 9781852330736. (Cité page 81.)

[114] M. Vidyasagar, *Nonlinear Systems Analysis*. Prentice Hall, London, first edition, 1978 ed., 1993. (Cité page 81.)

[115] B. Gillespie and M. Cutkosky, "Stable user-specific rendering of the virtual wall," in *ASME International Mechanical Engineering Conference and Exhibition*, vol. 58, pp. 397–406, Novembre 17-22 1996. Atlanta, GA. (Cité page 85.)

[116] C. Zilles and J. Salsbury, "A constraint-based god-object metho for haptic display," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS'95)*, pp. 146–151, 1995. Pittsburgh, PA. (Cité page 85.)

[117] G. Baker and P. Graves-Morris, *Padé Approximants*. Encyclopedia of Mathematics and its Applications, N 59, 2nd Ed, 1996. ISBN 0521450071. (Cité page 86.)

[118] M. Saghir and W. Book, "Wave-Based Teleoperation with Prediction," in *American Control Conference (ACC'01)*, pp. 4605–4611, June 2001. Arlington, VA. (Cité pages 92 et 93.)

[119] F. Smith, D. Backman, and S. Jacobsen, "Telerobotic manipulator for hazardous environments," in *Journal of Robotic Systems*, 1992. (Cité page 93.)

[120] Q. Lin and C. Kuo, "Virtual tele-operation of underwater robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97)*, pp. 546–551, 1997. (Cité page 93.)

[121] N. Diolaiti and M. C., "Tele-operation of a mobile robot through haptic feedback.," in *IEEE International Workshop on Haptic Virtual Environments and Their Applications (HAVE'02), Ottawa, Ontario, Canada*, 2002. (Cité page 93.)

[122] D. Lee, M.-P. D., and M. Spong, "Bilateral teleoperation of a wheeled mobile robot over delayed communication network," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'06), Orlando, Florida*, 2006. (Cité page 93.)

[123] N. Mitsou, V. S.V., and T. C.S., "Visuo-haptic interface for teleoperation of mobile robot exploration tasks," in *15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RoMAN'06)*, pp. 157–163, 2006. (Cité page 93.)

[124] S. Furner, A. Hardwick, and D. Hands, "Haptic transmission over ip networks : image perception in response to increasing latency," in *EUROHAPTICS*, 2001. (Cité page 101.)

[125] E. Sallnas, "Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 7, no. 4, pp. 461–476, 2000. (Cité page 101.)

[126] P. Buttolo, R. Oboe, B. Hannaford, and W.McNeely, "Force feedback in shared virtual simulations," in *Proceedings of Conference on Cad/Cam and Computer Graphics (MICAD'96), Paris*, 1996. (Cité page 102.)

[127] R. Sharp, "Vibrational modes of motorcycles and their design parameter sensitivities," *Vehicle NVH and Refinement, Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering*, pp. 107–121, 1994. (Cité pages 113 et 122.)

[128] T. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International Publication, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9. (Cité page 115.)

[129] C. Koenen, "The dynamic behaviour of motorcycles when running straight ahead and when cornering," *PhD Thesis*, 1983. (Cité pages 116 et 123.)

[130] E. Bakker, L. Nyborg, and H. Pacejka, "Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies," *SAE SAE Technical Paper Series*, no. 870421, 1987. (Cité pages 116 et 120.)

[131] H. Pacejka and R. S. Sharp, "Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions : A review of modelling aspects," *Vehicle System Dynamics*, vol. 20, pp. 121–176, 1991. (Cité page 116.)

[132] P. Ratti, "Modélisation du pneumatique pour l'étude du comportement routier des véhicules automobiles," *Thèse de Doctorat*, 1986. (Cité page 116.)

[133] A. Zanten, "Measurement and simulation of transients in longitudinal and lateral tire forces," *SAE SAE Technical Paper Series*, no. 900210, 1990. (Cité page 116.)

[134] E. Bakker, H. Pacejka, and L. Lidner, "A new tire model with an application in vehicle dynamics studies," *SAE SAE Technical Paper Series*, no. 870421, 1989. (Cité pages 117 et 138.)

[135] G. Gissinger, *Contôle-commande de la voiture*. Ed. Lavoisier, 2002. ISBN 2-7462-0511-4. (Cité page 117.)

[136] T. Takahashi and M. Hada, "Modeling of tire overturning moment characteristics and the analysis of their influence on vehicle rollover behavior," *Modeling, Analysis and Control Methods for Improving Vehicle Dynamic Behavior, Special Issue of Technical Journal of Toyota Research & Development*, vol. 38, no. 4, 2003. (Cité page 117.)

[137] R. Lot, "A motorcycle tire model for dynamic simulations : Theoretical and experimental aspects," *Meccanica*, vol. 39, no. 3, pp. 204–218, 2004. (Cité page 118.)

[138] V. Cossalter, A. Doria, and R. Lot, "Steady turning of two wheel vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 31, pp. 157–181, 1999. (Cité pages 118, 119 et 120.)

[139] V. Cossalter, *Motorcycle* D*ynamics*. Greendale, WI, 2002. ISBN 0-9720514-0-6. (Cité page 118.)

[140] R. Mendoza, "Sur la modélisation et la commande de véhicules automobiles," *Thèse de Doctorat*, 2000. (Cité page 119.)

[141] R. Berritta, F. Biral, , and S. Garbin, "Evaluation of motorcycle handling with multibody modelling and simulation," *6th international conference on High tech engines and cars*, 2000. (Cité pages 119 et 120.)

[142] H. Pacejka and E. Bakker, "The magic formula tyre model," *Vehicle System Dynamics*, vol. 21, pp. 1–18, 1991. (Cité page 120.)

[143] E. D. Vries and H. Pacejka, "Motorcycle tyre measurements and models," *Proceedings of the 15th International Symposium on Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD'97)*, pp. 280–298, 1997. (Cité page 120.)

[144] Y. Tezuka, H. Ishii, and S. Kiyota, "Application of the magic formula tire model to motorcycle maneuverability analysis," *Journal of Japaneese Society Automotive Engineering*, vol. 22, pp. 305–310, 2001. (Cité pages 120 et 143.)

[145] E. D. Vries and H. Pacejka, "The effect of tire modelling on the stability analysis of a motorcycle," *Proceedings of the 4th international symposium on advanced vehicle control*, pp. 063/1–063/6, 1998. (Cité pages 120 et 143.)

[146] V. Cossalter and A. Doria, "Model simulation : The latest dynamic simulation developments for motorcycle tires," *Tire Science and Technology*, pp. 38–41, 2001. (Cité page 120.)

[147] R. Sharp, "The lateral dynamics of motorcycles and bicyles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 14, pp. 265–283, 1985. (Cité page 121.)

[148] F. Whipple, "Stability of the motion of a bicycle," *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 30, 1899. (Cité page 121.)

[149] G. Bower, "Steering and stability of single track vehicles," *The Automobile Engineer*, vol. 5, pp. 280–283, 1915. (Cité page 121.)

[150] R. Pearsall, "The stability of the bicycle," *Proceedings of Instrumentation ans Automotive Engineering*, vol. 17, pp. 395–402, 1922. (Cité page 121.)

[151] M. Kondo, A. Nagaok, and F. Yoshimura, "Theoretical study on the ruuning stability of two-wheelers," *Transactions of Society Automotive Engineering*, vol. 17, no. 1, p. 1, 1963. (Cité page 121.)

[152] D. Eaton and L. Segel, "Lateral dynamics of the uncontrolled motorcycle," *Second International Congress on Automotive Safety*, 1973. (Cité page 121.)

[153] L. Segel and R. Wilson, "Requirements for describing the mechanics of tyres used on single-track vehicles," *IUTAM Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Railway Tracks*, 1975. (Cité page 121.)

[154] R. Sharp, "The influence of frame flexibility on the lateral stability of motorcycles," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 16, no. 2, 1974. (Cité page 122.)

[155] R. Sharp, "The stability of motorcycles in acceleration and decelerations," *Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 45–49, 1976. (Cité page 122.)

[156] R. Sharp, "The influence of suspension system on motorcycle weave-mode oscillations," *Vehicle System Dynamics*, vol. 5, pp. 147–154, 1976. (Cité page 122.)

[157] V. Goel, "Dynamics and handling characteristics of single track vehicles during braking and acceleration," *8th IAVSD Symposium at Cambrige*, 1983. (Cité page 122.)

[158] D. Weir, J. Zellner, and G. Teper, "Motorcycle handling," *Report TR-1086-1 of Systems Technology Inc*, vol. 2, 1978. (Cité page 122.)

[159] G. Jennings, "A study of motorcycle suspension damping characteristics," *SAE Technical Paper Series*, no. 740628, 1974. (Cité page 123.)

[160] G. Roe and T. Thorpe, "A solution of the low speed wheel flutter instability in motorcycles," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 18, no. 2, pp. 57–65, 1976. (Cité page 123.)

[161] R. Sharp and C. Alstead, "The influence of structural flexibilities on the straight-running stability of motorcycles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 9, no. 6, pp. 327–357, 1980. (Cité page 123.)

[162] P. Spierings, "The effects of lateral front fork flexibility on the vibrational modes of straightrunning single track vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 10, no. 1, pp. 21–35, 1981. (Cité page 123.)

[163] V. Cossalter and R. Lot, "A motorcycle multibody model for real time simulation based on the natural coordinates approach," *Vehicle System Dynamics*, vol. 37, no. 6, pp. 423–447, 2002. (Cité pages 124 et 146.)

[164] M. D. Lio, A. Doria, and R. Lot, "A spatial mechanism for the measurement of the inertia tensor : Theory and experimental results," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 121, pp. 111–116, 1999. (Cité page 125.)

[165] M. Burckhardt, *Fahrwerktechnik : Radschlupfregelsysteme*. Würzburg : Vogel-Verlag, Germany, 1993. (Cité page 134.)

[166] B. Guvenc and E. Kural, "Adaptive cruise control simulator, multiple-driver-in-the-loop simulator," *IEEE control and systems magazine*, vol. 26, no. 3, pp. 42–55, 2006. (Cité page 134.)

[167] W. Khalil and E. Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermes science publications, Paris, 2nd edition, 1999. ISBN 978-2746200036. (Cité page 135.)

[168] J. Hollerbach, "A recursive lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity," *IEEE Transaction on systems, man and cybernetics*, vol. 10, no. 11, pp. 730–736, 1980. (Cité page 135.)

[169] A. Shabana, *Dynamics of multibody systems*. John wiley & sons, Paris, 2nd edition, 1989. ISBN 978-0521594462. (Cité page 137.)

[170] R. Sharp, S. Evangelou, and D. Limebeer, "Advances in modelling of motorcycle dynamics," *Multibody System Dynamics*, vol. 12, pp. 251–283, 2004. Kluwer Academic Publishers. (Cité page 138.)

[171] J. Carré, C. Filou, and A. Ziani, "Insécurité des cyclomotoristes : Résultats en france, bilan international des études, situation aux pays-bas," *Rapport INRETS AR-DR0170*, 1996. (Cité page 142.)

[172] C. Filou, M. Lagache, and C. Decamme, "La sécurité des motocyclettes en 1999 : Etude sectorielle," *Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière, La documentation française*, 2001. (Cité page 142.)

[173] C. Filou and A. Julien, "Accidentologie des jeunes cyclomotoristes en agglomération," *Rapport INRETS AR-DR0186*, 2001. (Cité page 142.)

[174] C. Filou, "Analyse de l'exposition au risque des deux-roues motorisés," *Rapport DSCR/INRETS*, 2001. (Cité pages 142 et 143.)

[175] J. Carré and C. Filou, "Accident risk for two-wheelers in france : Safety for two-wheelers is largely subject to the skill and vigilance of car drivers," in *14th Enhanced Safety Vehicle Conference*, 1994. (Cité page 143.)

[176] P. V. Eslande, "Analyse approfondie d'accidents de deux-roues à moteur : défaillances fonctionnelles et scénarios d'erreur," *Rapport DSCR/INRETS*, 2002. (Cité page 143.)

[177] B. Amans and M. Moutreuil, "Rider : Recherche sur les accidents impliquant un deux roues motorisé," *Rapport de Projet de Recherche*, 2005. (Cité pages 143 et 144.)

[178] J. Pedder, S. Hagues, and G. Mackay, "A study of 93 fatal two-wheeled motor vehicle accidents," in *Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, Goteborg*, p. 24, 1979. (Cité page 143.)

[179] M. Mackay, "Leg injuries to motorcyclists and motorcycles design," in *29th Annual Proceedings, Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 1985. (Cité page 143.)

[180] R. Berritta, V. Cossalter, A. Doria, and R. Lot, "Implementation of a motorcycle tyre model in a multibody code," *Tire Technology International*, 1999. (Cité page 143.)

[181] K. Obenski, "Motorcycle accident reconstruction : Understanding motorcycles," *USA : Lawyers and Judges Publishing CO*, 1994. (Cité page 143.)

[182] T. Chang, "Eight-degrees-of-freedom kinematic model demonstrating after-impact motorcycle's behavior," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 25, no. 6, p. 679, 2002. (Cité page 143.)

[183] S. Evangelou, "Influence of road camber on motorcycle stability," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 75, no. 6, p. 231, 2008. (Cité pages 145 et 152.)

[184] D. Karnopp and R. Hibbard, "Optimum roll angle behavior for tilting ground vehicle," *ASME Journal of Transportation Systems (DSC)*, vol. 44, p. 29, 1992. (Cité page 145.)

[185] S.-G. So and D. Karnopp, "Methods of controlling the lean angle of tilting vehicles," *ASME Advanced Automotive Technologies (DSC)*, vol. 52, p. 311, 1993. (Cité page 145.)

[186] S. Kidane, L. Alexander, R. Rajamani, P. Starr, and M. Donath, "Road bank angle considerations in modeling and tilt stability controller design for narrow commuter vehicles," in *American Control Conference, Minneapolis, USA*, p. 413, 2006. (Cité page 146.)

[187] D. Pomerleau, T. Jochem, C. Thorpe, P. Batavia, D. Pape, J. Hadden, N. McMillan, N. Brown, and J. Everson, "Run-off-road collision avoidance using ivhs countermeasures," *Technical Report DOT HS 809 170, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration*, 1999. (Cité page 153.)

[188] J. Freeman, G. Papelis, Y. Papelis, A. Tayyab, R. Romano, and J. Kuhl, "The Iowa driving simulator : An implementation and application overview," *SAE Technical Paper Series*, no. 950174, 1995. (Cité page 161.)

[189] W. Kiding and F. Hoffmeyer, "The advanced Damler-Benz driving simulator," *SAE Technical Paper Series*, no. 950175, 1995. (Cité pages 161 et 166.)

[190] M. Dagdelen, G. Reymond, A. Kemeny, M. Bordier, and N. Maïza, "MPC based motion cueing algorithm : Development and application to the ULTIMATE driving simulator," *Driving Simulation Conference DSC Europe 2004*, pp. 221–233, 2004. (Cité page 161.)

[191] R. Allen, T. Rosenthal, B. Aponso, A. Harmsen, and S. Markham, "Low cost pc-based techniques for simulation implementation," *Driving Simulation Conference DSC Europe 1999*, 1999. (Cité page 163.)

[192] Salur and al, "Driving simulators as a mean of studying the interaction between driver and vehicle," *Internal Volvo report ER-520034*, 2000. (Cité page 164.)

[193] P. Padmos and M. Milder, "Qualité criteria for simulator images : A literature review," *Human Factors*, vol. 34, no. 6, pp. 727–748, 1992. (Cité page 164.)

[194] D. Weir and A. Clark, "A survey of Mid-Level driving simulators," *SAE Technical Paper Series*, no. 950172, 1995. (Cité pages 164 et 169.)

[195] M. Pinto, V. Cavallo, and T. Ohlmann, "The development of driving simulators : Towards a multisensory solution," *Le travail Humain*, vol. 71, no. 1, pp. 62–95, 2008. (Cité page 164.)

[196] L. Franck, J. Casalli, and W. Wierville, "Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator," *Human Factors*, vol. 30, pp. 201–217, 1988. (Cité page 164.)

[197] E. Haug, "Feasibility study and conceptual design of a national advanced driving simulator," *National Highway Traffic Safety Administration Report HS-807 596*, 1990. (Cité page 164.)

[198] R. Allen and H. Jex, "Driving simulation - requirements, mechanisation and application," *SAE Technical Paper Series*, no. 800448, 1980. (Cité page 164.)

[199] S. Singhal and D. Cheriton, "Exploiting position history for efficient remote rendering in networked virtual reality," *Presence : Teleoperation and Virtual Environment*, vol. 4, no. 2, pp. 169–193, 1995. (Cité page 164.)

[200] M. Mon-Williams, J. Wann, and S. Rushton, "Binocular vision in a virtual world : Visual deficits following the wearing of a head-mounted-display," *Ophtalmic and Physiological Optics*, vol. 13, pp. 387–391, 1993. (Cité page 164.)

[201] K. Genuit and W. Bray, "A virtual car : Prediction of sound and vibration in an interactive simulation environment," *Proceedings of SAE Noise & Vibration Conference & Exposition*, 2001. (Cité page 165.)

[202] M. Blommer and J. Greenberg, "Realistic 3d sound simulation in the virttex driving simulator," *Driving Simulation Conference (DSC'03)*, 2003. (Cité page 165.)

[203] J. Colinot and G. Belay, "A multifunctional sound generator for the PSA's sherpa driving simulators," *Driving Simulation Conference DSC Europe 2000*, 2000. (Cité page 165.)

[204] G. Bertollini, C. Johnston, J. Kuiper, J. Kukula, M. Kulczycka, and W. Thomas, "The general motors driving simulator," *SAE Technical Paper Series*, no. 940179, 1994. (Cité page 165.)

[205] G. Reymond, A. Kemeny, A. Heidet, and M. Canry, "Validation of renault's dynamic simulator for adaptive cruise control experiments," *Driving Simulation Conference DSC Europe 2000*, pp. 181–191, 2000. (Cité page 165.)

[206] J. Merlet, *Les Robots Parallèles*. Hermes Science Publications, 1997. Deuxième Edition. (Cité page 169.)

[207] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," *Proceedings of United Kingdom Institution of Mechanical Engineers (IMechE)*, vol. 180, no. 1, pp. 371–385, 1965. (Cité page 169.)

[208] E. Britannica, "human ear," *Ultimate Reference Suite*, 2008. (Cité page 182.)

[209] P. Buser and M. Imbert, "Le système vestibulaire," *Psychophysiologie sensorielle : neurophysiologie fonctionnelle II, ed Hermann*, pp. 256–290, 1982. (Cité page 182.)

[210] A. Sans, "Les cellules sensorielles vestibulaires : aspects neuromorphologiques et fonctionnels," *Données actuelles sur la physiologie et la pathologie de l'oreille interne, ed Arnette*, pp. 47–55, 1990. (Cité page 182.)

[211] R. Telban and F. Cardullo, "Motion cueing algorithm development : Human-centered linear and nonlinear approaches," *NASA Report CR-213747*, 2005. (Cité page 182.)

[212] G. Zacharias, "Motion cue models for pilot-vehicle analysis," *AMRL-TR-78-2*, 1978. (Cité page 182.)

[213] J. Goldberg and C. Fernandez, "The vestibular system," *Handbook of Physiology - The nervous system III*, pp. 916–977, 1984. (Cité page 182.)

[214] R. Telban, F. Cardullo, and J. Houck, "Developments in human centered cueing algorithms for control of flight simulator motion systems," *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 1999. (Cité page 183.)

[215] R. Telban and F. Cardullo, "Motion cueing algorithm development : New motion cueing program implementation and tuning," *NASA Report CR-213746*, 2005. (Cité page 183.)

[216] R. Parrish, J. Dieudonne, and R. Bowles, "Coordinated adaptive washout for motion simulators," *Journal of Aircraft*, vol. 12, no. 1, pp. 44–50, 1975. (Cité page 183.)

[217] M. Nahon, L. Reid, and J. Kirdeikis, "Adaptive simulator motion software with supervisory control," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 15, no. 2, pp. 376–383, 1992. (Cité page 183.)

[218] S. Schmidt and B. Conrad, "Motion drive signals for piloted flight simulators," *NASA Report CR-1602*, 1970. (Cité page 183.)

[219] P. Grant and L. Reid, "Motion washout filter tuning : Rules and requirements," *Journal of Aircraft*, vol. 34, no. 2, pp. 145–151, 1997. (Cité page 184.)

[220] M. Dagdelen, G. Reymon, and A. Kemeny, "Analysis of the visual compensation in the renanlt driving simulator," *Driving Simulation Conference (DSC'02)*, pp. 109–119, 2002. (Cité page 185.)

[221] J. Ares, A. Brazalez, and J. Busturica, "Tuning and validation of the motion platform washout filter parameters for a driving simulator," *Proceedings of Driving Simulation Conference (DSC'01)*, pp. 295–304, 2001. (Cité page 187.)

[222] M. Nahon and L. Reid, "Simulator motion-drive algorithms : A designer's perspective," *Journal of Aircraft*, vol. 13, no. 2, pp. 356–362, 1990. (Cité page 187.)

[223] G. Reymond and A. Kemeny, "Motion cueing in the renault driving simulator," *Vehicle System Dynamics*, vol. 34, no. 4, pp. 249–259, 2000. (Cité page 187.)

[224] Y. Miyamaru, G. Yamasaky, and K. Aoky, "Development of motorcycle riding simulator and its prehistory," *JSME Review*, vol. 50, 2000. (Cité page 193.)

[225] Y. Miyamaru, G. Yamasaky, and K. Aoky, "Development of motorcycle riding simulator," *JSAE Review*, vol. 23, pp. 121–126, 2002. (Cité page 193.)

[226] G. Yamasaky, K. Aoky, Y. Miyamaru, and K. Ohnuma, "Development of motorcycle training simulator," *JSAE Review*, vol. 19, pp. 81–85, 1998. (Cité pages 193 et 197.)

[227] D. Ferrazzin, F. Barbagli, C. Avizzano, D. D. Pietro, and M. Bergamasco, "Designing new commercial motorcycles through a highly reconfigurable virtual reality-based simulator," *Advanced Robotics*, vol. 17, no. 4, pp. 293–318, 2003. (Cité page 194.)

[228] A. Codourey and E. Burdet, "A body-oriented method for finding a linear form of the dynamic equation of fully parallel robots," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97)*, vol. 2, pp. 1612–1618, 1997. (Cité page 203.)

[229] J. Jalon and E. Bayo, *Kinematics and Dynamics Simulation of Multibody Systems*. Springer, 1994. (Cité page 203.)

[230] M. Donghai and J. Hollerbach, "Identifying mass parameters for gravity compensation and automatic torque sensor calibration," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'96)*, vol. 1, pp. 661–666, 1996. (Cité page 204.)

[231] J. Craig, *Adaptive Control of Mechanical Manipulators*. Addison-Wesley Publishing Company, 1988. ISBN 0-201-10490-3. (Cité page 204.)

Notations

φ, θ, ψ, δ	angles de roulis, tangage, lacet et de braquage
F_x, F_y	force de glissement longitudinal et latéral
M_x, M_y, M_z	moments pneumatiques de renversement,
	de résistance au roulement et d'auto-alignement
κ, α, γ	glissement longitudinal, latéral et angle du carrossage
K_α, K_γ, M_i	rigidité de dérive, du carrossage et radiale
σ	longueur de relaxation
t, t_g	chasse pneumatique et géométrique
ϵ	angle de chasse
N, N_f, N_r	charge verticale totale et sur chacune des roues avant et arrière
v, v_x, v_y, V	Vitesse longitudinale et ses composantes x et y, et aussi sa norme V
ω	vitesse de rotation
F_D	force aérodynamique
m_s, m_v	masse suspendue et masse non suspendue, la masse totale est égale à $m = m_s + m_v$
$\mathbf{H}_i^j$, $\mathbf{M}_i^j$	moment dynamique au point i exprimé dans le repère j
$\Omega_{i/k}^j$, $\dot{\Omega}_{i/k}^j$	vecteur de vitesse de rotation du repère i par rapport au repère k
	exprimée dans le repère j, et sa dérivée
$\mathcal{R}_{i\to j}$	matrice de rotation projetant un vecteur
$\mathcal{R}_{i\to j}$	exprimé dans un repère i vers un repère j
$\Im^i$	matrice de tenseur d'inertie exprimé dans le repère i
R	Rayon d'une roue
ρ_i, $\dot{\rho}_i$, $\ddot{\rho}_i$	élongations des vérins et ses dérivées
$\mathbf{W}$	Torseur cinématique
$\mathcal{E}$	matrice de passage de vitesse
$\mathcal{J}_{-1}$	matrice Jacobienne
$\mathbf{u}$	vecteur directeur du vérin
Γ_i	torseur dynamique autour du point i
HF, BF	composantes hautes fréquences et basses fréquences

Les lettres caligraphique sont utilisées pour les matrices Les lettres écrites en gras sont utilisées pour les vecteurs Les lettres normales désignent une variable scalaire

Ce document a été préparé à l'aide de l'éditeur de texte GNU Emacs et du logiciel de composition typographique LaTeX 2_ε.

Titre Conception, Mécatronique et Contrôle des Plateformes dédiées aux Applications Centrées Humain

Résumé Ce mémoire constitue une synthèse de mes sept années d'exercice en tant que maître de conférences à l'Université d'Evry Val d'Essonne depuis septembre 2003. Il retrace mes activités de recherche avec le souci constant de maintenir un lien et une cohérence avec mon activité d'enseignement.
Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches synthétise les travaux que j'ai menés dans le domaine de la robotique. Ils traitent de trois thématiques principales en interaction : la commande des dispositifs à rendu haptique, la simulation de conduite et dernièrement la sécurité routière. Les liens reliant l'ensemble de mes études sont mis en exergue afin de délimiter le programme de recherche qui en découle et présenter les réflexions que je souhaiterais développer dans le future.

Mots-clés Rendu Haptique, Système d'Alertes pour la conduite deux roues, Simulation et Simulateur de Conduite, etc.

Title Design, Mechatronics and Control of Platforms dedicated to Human-Centered Applications

Abstract This manuscript constitutes a resume of my seven years experience as an Associate Professor at Evry Val d'Essonne University. It relates my research activities with the constant concern to maintain a close relation and consistency with my teaching activities. This manuscript of "Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)" synthesizes the work I have acheave in the field of robotics. They address three main scientific themes in interaction : Control of Haptic devices, Driving Simulation and recently Road Safety. The links connecting all of my studies are highlighted to define the research agenda followed and submit the thoughts I would like to develop in the future.

Keywords Haptics, Preventive Road Security, Warning Systems for Motorcyclist, Motorcycle Driving Simulator, etc.