

Numérisation et Reconstruction 3D de la Géométrie de la Route par Observateurs et Stéréovision

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le - - Septembre 2009

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université d'Évry Val d'Essonne
(spécialité automatique et robotique)**

par

Yazid Sebsadji

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Ali CHARARA Roland CHAPUIS	Professeur à l'Université de Compiègne-Heudiasyc Professeur à l'université Clermont Ferrand-LASMEA
<i>Examinateurs :</i>	Mohammed M'SAAD Daniel LECHNER Frédéric HOLZMANN	Professeur à l'Université de Caen-Greyc Directeur de Recherche à INRETS Continental VDO Automotive, Regensburg, Allemagne
<i>Encadrant :</i>	Sébastien GLASER	Chargé de recherche au LCPC
<i>Directeur :</i>	Saïd MAMMAR Didier AUBERT	Professeur à l'Université d'Évry Val d'Essonne-IBISC Directeur de recherche à INRETS

Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
Unité mixte INRETS / LCPC 14, route de la Minière 78000 Versailles-Satory



Avant-propos

1 Résumé

La connaissance du profil et des attributs de la route est un élément critique dans le développement des assistances à la conduite. Ceci est notamment le cas pour les applications d'alerte et d'aide au maintien de voie.

Les résultats des travaux de perception, vidéo notamment, permettent uniquement une localisation relative du véhicule par rapport à la route. Ce type de localisation ne permet pas l'accès au positionnement absolu de la route. A ce titre, il est impossible d'avoir accès au devers de la route via une seule caméra vidéo montée en vision frontale.

Pour surmonter cette difficulté, nous proposons dans cette thèse une approche de numérisation et de reconstruction 3D de la géométrie de la route (pente, devers et courbure) dans un repère absolu supposé galiléen. L'idée générale de la numérisation 3D de la route, consiste à localiser le véhicule en 3D, faire le recalage pour obtenir celui du centre de la voie et d'associer à chaque positionnement les valeurs numériques des différents attributs de la route.

L'approche développée consiste en la fusion d'informations provenant d'une part de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs et d'autre part d'observateurs. On y distingue trois phases principales : La première a pour objet l'estimation des attributs de la route à l'aide d'observateurs. La deuxième est dédiée au positionnement relatif de la route par rapport au véhicule à partir de capteurs de vision embarqués sur le véhicule. La dernière phase aboutit à la reconstruction 3D de la route par fusion des informations provenant des deux premières phases.

Techniquement les états des véhicules et les attributs de la route sont reconstruit à l'aide de filtres de Kalman étendus et d'observateurs à entrées inconnues. Par la suite, la géométrie 3D de la route, dans le repère absolu, est obtenue en calculant la matrice de passage du repère relatif, lié aux capteurs embarqués, au repère absolu. On utilise pour cela un schéma de fusion avec les données issues du capteur vidéo et les données GPS en utilisant les techniques IMM (Interacting Multiple Models).

Mots Clés : géométrie de la route, attributs de la route, modélisation du véhicule, mouvements de la caisse, observateurs, estimateurs, observabilité, identification, expérimentation, stéréovision, vision artificielle.

2 Abstract

The knowledge of the profile and the road attributes is a critical item in the development of driving assistances. This is specially the case for alert applications and lateral control. The results of the perception studies, specially the video, only allow a relative localization of the vehicle on the road. This kind of localization does not allow the access to absolute positioning

of the road. For this reason, it is impossible to have access to the road bank via only one video camera fixed in frontal view.

To overcome this difficulty, we propose in this thesis an approach of digitalization and 3D-reconstruction of the geometry of the road (slope, road bank and curvature) in an absolute frame, supposed Galilean. The general idea of 3D-digitalization of the road consist in localizing the vehicle in 3D, doing the correction to obtain the one of the road center and to associate, to each positioning, the numerical values of the different attributes of the road.

The developed approach consists in the fusion of information coming from proprioceptive and exteroceptive sensors on one hand and observers on the other. We find in it three principal stages : The first one has for object the estimation of the road attributes via observers. The second one is dedicated to the relative positioning of the road beside the vehicle via embedded video sensors in the vehicle. The last stage leads to the 3D-reconstruction of the road via fusion of information coming from the two first stages.

Technically, the states of the vehicles and the road attributes are reconstructed by application of the extended Kalman filters and proportional integral observers with unknown inputs. Afterwards, the 3D-geometry of the road, in the absolute landmark, is obtained by calculating the transfer matrix from the relative frame, linked to embedded sensors, to the absolute frame. For that, we use a fusion scheme with the video sensors and GPS data by using the IMM techniques.

Index Terms : road geometry, road attributes, modelisation of the vehicle, vehicle movements, observators, estimators, observability, identification, experimentation, stereovision, artificial vision.

Liste des publications

Revues internationales

1. **Y. Sebsadji**, A. Ndjeng Ndjeng, N. Benmansour, R. Labayrade S. Glaser, S. Mammar, D. Gruyer and D. Aubert, *Digitalization and 3D Estimation of the Road*, Journal (soumis).
2. **Y. Sebsadji**, S. Glaser S. Mammar *Road Bank Angle Estimation Using Unknown Input Proportional Integral Observer*, Journal ITS, (soumis).

Articles de conférences internationales avec actes

1. **Y. Sebsadji**, S. Glaser and S. Mammar, *Vehicle Roll and Road Bank Angle Estimation*. IFAC World Congress, Seoul, Korea. July 2008.
2. **Y. Sebsadji**, S. Glaser and S. Mammar, *Estimation en Temps Réel des Angles de Tangage et de Roulis du Véhicule*, Conférence Internationale Francophone, Roumanie 2008.
3. **Y. Sebsadji**, N. Benmansour, S. Glaser, S. Mammar and D. Aubert *3D Reconstruction of the Road Geometry by Embedded Stereovision and Observers*, International Association for Vehicle System Dynamics, Stockholm, Suède, Août 2009.
4. **Y. Sebsadji**, N. Benmansour, S. Glaser, S. Mammar ,*3D Estimation of Road Cartography using Vehicle Localization and Observers*, IEEE International Conference on Control Automation Robotic and Vision, Hanoi, Vietnam, Dec 2008.
5. **Y. Sebsadji**, S. Glaser, S. Mammar and D. Dakhllallah, *Road Slope and Vehicle Dynamics States Estimation*. AmericanControl Conference, Seattle, Washington, USA, June 2008.
6. C. Sentouh, **Y. Sebsadji**, S. Glaser and S. Mammar, *Road Bank Angle and Faults Estimation Using Unknown Input Proportional-Integral observer*. ECC paper, Kos, Greece, July 2007.
7. N. Minoiu Enache, **Y. Sebsadji**, S. Mammar, B. Lusetti and S. Glaser *Integrated lane departure avoidance and lane keeping assistance : Theoretical and experimental study of the driver's influence on the lane keeping performance*, CCA, Saint Petersburg, Août 2009.
8. S. Mammar, **Y. Sebsadji**, S. Glaser, *Modèle Takagi-Sugeno et Retour de Sortie Statique pour l'Aide à la Manoeuvrabilité des Véhicules*, Conférence Internationale Francophone, Roumanie 2008.
9. S. Mammar, S. Glaser and **Y. Sebsadji**, *Time-To-Line-Crossing : from Perception to Control Variable*. ITSC 2007.
10. D. Dakhllallah, S. Glaser, S. Mammar and **Y. Sebsadji**. *Tire-Road Forces Estimation Using Extended Kalman Filter and Mobilized Friction Coefficient and Sideslip Angle Evaluation*. American Control Conference. ACC paper, Seattle, Washington, USA, June 2008.

Articles de conférences nationales avec actess

1. **Y. Sebsadji**, S. Glaser et S. Mammar, *Observateurs Non Linéaires en Cascade : Application à l'Estimation de l'État du Véhicule et des Attributs de la Route*. JN-JD-MACS. Angers, France, Mars 2009.
2. **Y. Sebsadji**, S. Glaser et S. Mammar, *Estimation de la pente de la route et les variables d'état du véhicule par le filtre de Kalman étendu*. JD-INRETS. Paris, France, Décembre 2007.

Table des matières

Avant-propos	i
1 Résumé	i
2 Abstract	i
Partie I Introduction, Motivations et État de l'Art	1
1 Introduction	3
2 Contexte et Objectifs	3
3 Organisation du document	4
Chapitre 1	
Reconstruction de la route : état de l'art	
1.1 Sécurité routière	8
1.1.1 Les niveaux de sécurité dans un véhicule routier	9
1.1.2 Les recherches menées dans le cadre de programmes : Assistance préventive	11
1.2 Reconstruction de la route : état de l'art	14
1.2.1 Méthodes de reconstruction du profil en long	15
1.2.2 Méthodes de reconstruction de la géométrie de la route	16
1.2.3 Observateurs pour la reconstruction des attributs de la route et les mouvements de la caisse	21
Partie II Modélisation du Véhicule et de la Géométrie de la Route	23
Chapitre 2	
Modélisation du véhicule et identification des paramètres	
2.1 Mouvements du véhicule	26
2.1.1 Définition des repères utilisés	26
2.1.2 Relation de changement de repère	28

2.2	Modélisation du véhicule	31
2.2.1	Principes fondamentaux de la dynamique	31
2.2.2	Calcul du moment dynamique H_O	32
2.2.3	Expression de l'accélération	32
2.2.4	Modèle de braquage	33
2.2.5	Forces extérieurs agissant sur le véhicule	33
2.2.6	Les glissements longitudinaux et transversaux	42
2.2.7	Moments de la caisse suspendue et moment de lacet	46
2.2.8	Modélisation de la suspension	49
2.2.9	Bilan des forces	50
2.3	Modèles simplifiés du véhicule	51
2.3.1	Modèle non linéaire à quatre roues	51
2.3.2	Modèle linéaire type Bicyclette	52
2.3.3	Modèle vertical de la suspension	54
2.4	Identification des paramètres dynamiques	56
2.5	Validation du modèle du véhicule	56
2.6	Conclusions	60

Chapitre 3

Géométrie de la route : État de l'art

3.1	La courbure	62
3.2	Le devers	64
3.3	La pente	65
3.4	L'uni	65
3.5	La largeur	66
3.6	Conclusions	68

Partie III Observateurs pour l'Estimation des Variables d'état du Véhicule et les Attributs de la Route et Reconstruction 3D de la Chaussée 69

Chapitre 4

Observabilité et observateurs : État de l'art

4.1	Stabilité des systèmes dynamiques : Stabilité de Lyapunov	72
4.2	Observateurs d'état	74
4.2.1	Définition d'un observateur	74
4.2.2	Observabilité d'un système dynamique	75

4.2.3	Observateurs pour les systèmes linéaires	78
4.2.4	Observateurs pour les systèmes non-linéaires	78
4.2.5	Filtre de Kalman standard et Kalman étendu	79
4.2.6	Observateur proportionnel intégral à entrées inconnues	80
4.2.7	Observateurs en cascade	84
4.3	Conclusion	87

Chapitre 5

Observateurs pour l'estimation des variables d'état du véhicule et les attributs de la route

5.1	Estimation des variables d'état du véhicule et de la pente de la route	91
5.1.1	Résultats des estimations	93
5.1.2	Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la variation du rayon de pneu	96
5.2	Estimation du devers de la route et du roulis du véhicule	97
5.2.1	Adaptation du système pour la conception de l'observateur	99
5.2.2	Résultats des estimations	100
5.2.3	Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la vitesse du véhicule	101
5.3	Estimation des mouvements de la caisse	101
5.3.1	Estimation de tangage et de pompage	104
5.4	Observateur PI pour l'estimation de la courbure	109
5.4.1	Adaptation du système pour la conception de l'observateur	110
5.4.2	Résultats des estimations	110
5.4.3	Robustesse de l'observateur vis-à-vis des variations de la vitesse du véhicule	112
5.5	Conclusions	112

Chapitre 6

Numérisation et estimation 3D de la géométrie de la route dans un repère absolu

6.1	Architecture globale	114
6.1.1	Les capteurs	114
6.1.2	Traitements de données	115
6.1.3	Numérisation de la route	115
6.2	Localisation du centre de la voie	116
6.2.1	Résultats de localisation	116
6.3	Numérisation et reconstruction 3D de la route	119

6.4	Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu	122
6.4.1	Reconstruction de la route par stéréovision	122
6.4.2	Reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule par stéréovision dans le repère absolu	124
6.5	Conclusions	130
Partie IV Équipements, Validation Expérimentale et Conclusions		133
Chapitre 7		
Équipements, expérimentation et validation		
7.1	Les capteurs utilisés	136
7.1.1	Le codeur d'angle de braquage	136
7.1.2	La centrale inertielle IMU	136
7.1.3	Le Correvit	137
7.1.4	Le GPS RTK	138
7.1.5	Capteurs de vision et de stéréovision	138
7.2	Moyens expérimentaux du LIVIC	139
7.2.1	Les véhicules expérimentaux	139
7.2.2	Les pistes d'essais	140
7.3	Validation des différents observateurs	140
7.3.1	Validation de l'estimateur des variables d'état du véhicule et de la pente de la route	141
7.3.2	Validation de l'estimation du dévers et de la courbure de la route	145
7.3.3	Validation de l'estimation de tangage et de pompage	152
7.3.4	Validation de la reconstruction 3D de la route	152
7.4	Conclusion	154
Conclusions Générale et Perspectives		157
Annexes		163
Annexe A Observabilité du modèle non linéaire du véhicule		163
Annexe B Identification des paramètres du véhicule		165
B.1	Principe de l'identification des paramètres statiques et dynamiques	165
B.1.1	Mise en équation	165

B.1.2	Choix de mesures pour l'identification	165
B.1.3	Pré-traitement des données	166
B.2	Méthodes d'identification	166
B.2.1	L'algorithme PEM	166
B.3	Simulations et validations	167
B.3.1	Identification de I_z , C_f et C_r	167
B.3.2	Identification des paramètres I_x , k_r , et b_r	169
Annexe C Résultats d'estimation des autres variables d'état du véhicule		173
Bibliographie		177

Table des matières

Table des figures

1.1	Les tués sur les routes en Europe par million d'habitants (année 2008)	8
1.2	Approche intégrée de sécurité [Lii02]	9
1.3	Les trois principaux domaines de la sécurité routière [Mor03]	10
1.4	Défaillance humaine - Source CCFA [Ccf04]	11
1.5	Vision PROMETHEUS d'un trafic futur sûr et efficace.	13
1.6	L'Analyseur de Profil en Long (APL) et son schéma de principe	15
1.7	Deux types de systèmes stéréoscopiques. <i>a)</i> Un capteur intégré. <i>b)</i> Des caméras embarquées dans un véhicule d'essais. Les deux caméras positionnées sur les bords forment un capteur stéréoscopique.	18
1.8	Le véhicule MOGéO dédié à la reconstruction de la géométrie de la route.	19
1.9	Résultats de tests de localisation par GPS-RTK, à la Défense-France (<i>a</i>) et à Guyancourt-France (<i>b</i>)	20
2.1	Les six mouvements du véhicule.	27
2.2	Repère absolu et repère véhicule : \mathbf{R}_a et \mathbf{R}_v	29
2.3	Repères liés à la pente et au dévers : \mathbf{R}'_v et \mathbf{R}''_v	29
2.4	Repère lié à la caisse : \mathbf{R}_c	31
2.5	Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka	36
2.6	Variation des forces latérales en fonction de la dérive du pneumatique et des forces normales selon Pacejka	37
2.7	Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka pour des variations de C_p , B_p , D_p et E_p	37
2.8	Efforts longitudinaux et transversaux des pneumatiques suivant le modèle initial de Pacejka	38
2.9	Efforts d'auto-alignement des pneumatiques suivant le modèle initial de Pacejka	38
2.10	Variation des efforts de glissement pur en fonction de la force normale, de l'adhérence et de la raideur du pneumatique	41
2.11	Représentation de l'ellipse de friction de Dugoff	41
2.12	Efforts longitudinaux et latéraux de Dugoff (trait plein) et Pacejka (pointillé) . .	42
2.13	Schématisation du rayon de la roue	43
2.14	Rayon de développement en freinage longitudinal (<i>b</i>) et parcours double-circulaire (forme de 8) (<i>a</i>) à vitesse constante	44
2.15	Vitesse du point de contact pneumatique chaussée	45
2.16	Angles de dérive des pneus selon Burchardt	46
2.17	Résultante des forces extérieures autour de l'axe de roulis	47
2.18	Résultante des forces extérieures autour de l'axe de tangage.	48
2.19	Résultante des forces extérieures autour de l'axe de lacet.	48

Table des figures

2.20 Représentation de la suspension du véhicule	49
2.21 Véhicule et forces extérieures	51
2.22 Représentation bicyclette du véhicule	53
2.23 Modèle de suspension	54
2.24 Représentation plane de la suspension	55
2.25 Schématisation de la démarche des validations	57
2.26 Véhicule d'essai du LIVIC	57
2.27 Le braquage des pneus avant.	58
2.28 Vitesses angulaires des pneumatiques et accélération du véhicule.	58
2.29 Vitesse de lacet et vitesse longitudinale estimées et mesurées.	59
2.30 Vitesse latérale et angle de dérive estimés et mesurés.	59
3.1 La courbure et le rayon de courbure	63
3.2 Géométrie longitudinale d'une route	64
3.3 Évolution du dévers en fonction du rayon de courbure pour les différents types de route	66
3.4 Exemple d'uni de chaussée : RN 10 - Trappes (78)	67
3.5 Variations de la force normale dues à l'uni	67
4.1 Principe d'estimation d'état	74
4.2 Schéma bloc de simulation de l'observateur proportionnel intégral	82
4.3 Observateurs en cascade	85
5.1 Structure globale de la méthode d'estimation.	91
5.2 Schéma bloc des simulations.	92
5.3 Braquage et vitesses angulaires des quatre roues	94
5.4 Résultat d'estimation et de simulation des variables d'état	95
5.5 Erreurs d'estimation des variables d'état	96
5.6 Forces longitudinales estimées et simulées	97
5.7 Forces latérales estimées et simulées	98
5.8 Forces normales estimées et simulées	99
5.9 La pente estimée et l'erreur d'estimation	100
5.10 Robustesse de l'estimation de la pente vis-à-vis de la variation de rayon de pneu .	101
5.11 Angle de braquage	102
5.12 Variables d'état estimées et simulées : angle de dérive (a), vitesse de lacet (b), angle de roulis (c) et vitesse de roulis (d).	102
5.13 Erreurs d'estimation des variables d'état	103
5.14 Dévers estimé et de référence	103
5.15 Robustesse de l'estimation du dévers vis-à-vis de la variation de la vitesse. . . .	104
5.16 Schéma-bloc de reconstruction de l'angle de tangage	106
5.17 Vitesse de roulis, vitesse de tangage et vitesse de lacet	107
5.18 Variables d'état simulées et estimées : angle de roulis (a) et angle de tangage (b)	108
5.19 Résultat d'estimation de pompage	108
5.20 Erreurs d'estimation de roulis et de tangage	109
5.21 L'angle de braquage appliqué aux roues avant	111
5.22 Résultat d'estimation de la courbure de la route	111
5.23 Robustesse de l'estimation de la courbure vis-à-vis des variations de la vitesse du véhicule	112

6.1	Architecture globale de l'estimation 3D de la géométrie de la route	115
6.2	Résultat de localisation en 2D	117
6.3	Erreur de positionnement selon l'axe \mathbf{X}_r et l'enveloppe de confiance 3σ	117
6.4	Erreur de positionnement selon l'axe \mathbf{Y}_r et l'enveloppe de confiance 3σ	118
6.5	Résultat d'estimation de l'altitude du véhicule	118
6.6	Résultat d'estimation de la courbure de la route (a), Vue de dessus de la piste (b) et les coordonnées X et Y de la piste, respectivement (c) et (d)	119
6.7	Résultat d'estimation de la pente de la route	120
6.8	Résultat d'estimation du dévers de la route	120
6.9	Résultat d'estimation 3D de la géométrie de la route	121
6.10	Perception de l'environnement du véhicule par caméras embarquées	123
6.11	Reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ en fonction de Θ_c et Ψ dans le repère relatif \mathbf{R}_{re}	125
6.12	Reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ en fonction de Φ_r et Ψ dans le repère relatif \mathbf{R}_{re}	126
6.13	Résultats de détection et de reconstruction de la route (images de synthèse) . . .	128
6.14	Résultats de détection et de reconstruction de la route (images réelle-1-)	129
6.15	Résultats de détection et de reconstruction de la route (images réelle-2-)	129
7.1	Capteur d'angle de braquage (codeur optique)	136
7.2	La centrale inertielle IMU	137
7.3	Le capteur Correvit	137
7.4	Le système GPS-RTK	138
7.5	Le capteur de vision (caméra)	138
7.6	Véhicules expérimentaux	139
7.7	Piste "La routière" : vue globale sur la piste (a) quelques virages et dévers correspondants ((b),(c) et (d))	140
7.8	Piste de vitesse	141
7.9	Piste "Le Val d'or" : (a) montre une vue globale sur la piste, (b) et (c) montrent le type de revêtement, (d) montre la courbure du circuit extérieur, (e) et (f) montrent respectivement l'altitude et la géométrie 3D de la piste	142
7.10	Angle de braquage (a), vitesses angulaires des pneumatiques (b) et les accélérations longitudinale et latérale (c)	142
7.11	Variables d'état simulées (trait continu) et estimées (trait discontinu)	143
7.12	Erreurs d'estimation des variables d'état	143
7.13	Résultats d'estimation des forces longitudinales	144
7.14	Résultats d'estimation des forces latérales	144
7.15	Résultats d'estimation des forces normales	145
7.16	Vitesses longitudinale et de lacet simulées (trait continu) et estimées (trait discontinu)	146
7.17	Vitesse latérale et angle de dérive simulés (trait continu) et estimés (trait discontinu)	147
7.18	Variation des forces longitudinales en fonction des glissements longitudinaux . .	147
7.19	Résultat d'estimation de la pente (trait continu) et la pente de référence (trait discontinu)	148
7.20	Vitesse longitudinale estimée par l'observateur de Luenberger (trait continu) et mesurée (trait discontinu)	148
7.21	Valeurs propres de l'observateur PI en fonction de la vitesse du véhicule	149

7.22 Angle de braquage	149
7.23 Vitesses de lacet et de roulis estimées (trait continu) et mesurées (trait discontinu)	150
7.24 Angle de dérive estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)	150
7.25 Erreur d'estimations des variables d'état du modèle bicyclette	151
7.26 Roulis du véhicule (a) et dévers de la route (b) estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)	151
7.27 Courbure de la route estimée (trait continu) et calculée (trait discontinu)	152
7.28 Angle de braquage (a) vitesse de roulis (b), vitesse de tangage (c) et vitesse de lacet (d)	153
7.29 Résultats d'estimation de l'angle de roulis (a), du pompage (b) et l'angle de tangage (c) estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)	153
7.30 Résultat de reconstruction de la géométrie de la route	154
7.31 Résultats de détection des bords gauche et droit de la route - image 7.1- par stéréovision)	155
7.32 Résultats de reconstruction des bords gauche et droit de la route (image 7.1) par stéréovision dans le repère relatif (a) et dans le repère absolu (b)	155
B.1 Vitesse latérale simulée et mesurée	168
B.2 Vitesse de lacet simulée et mesurée	169
B.3 Angle de dérive simulé et mesuré	170
B.4 Vitesse de lacet estimée et mesurée	171
B.5 Angle de roulis simulé et mesuré	171
B.6 Vitesse de roulis simulée et mesurée	171
C.1 Résultat d'estimation des glissements longitudinaux	174
C.2 Résultat d'estimation des angles de dérive des pneumatiques (glissements latéraux)	174
C.3 Résultat d'estimation de l'adhérence mobilisable des pneumatiques	175
C.4 Variations des forces longitudinales en fonction des glissement longitudinaux	175
C.5 Variation des forces latérales en fonction des glissement latéraux	175
C.6 Résultat d'identification des raideurs longitudinales des pneumatiques	176
C.7 Résultat d'identification des raideurs latérales des pneumatiques	176

Liste des tableaux

1.1	Nombre d'accidents et de tués à trente jours en France métropole	8
3.1	$f(V)$ pour les vitesses caractéristiques	62
3.2	Rayon minimum au dévers maximum	65
3.3	Rayon minimum au dévers minimum	65
3.4	Pente maximale en fonction du type de la route	65
3.5	Rayon minimum en longitudinal pour la visibilité	66
3.6	Vitesses limites en fonction du type de la route	68
5.1	Erreurs d'estimation : moyenne et maximale	100
5.2	Erreur d'estimation des variables d'état du modèle linéaire - moy/max	101
6.1	Résultat de numérisation de la route	122
6.2	Variations des coordonnées de reconstruction du point P_1 dans le repère relatif en fonction des variations de Θ_c	125
6.3	Variations des coordonnées de reconstruction du point P_1 dans le repère relatif en fonction des variations de Φ_r	125
6.4	Estimation des paramètres de la route (images de synthèse)	130
6.5	Estimation des paramètres de la route des images réelles	130
B.1	Résultats d'identification des paramètres C_f , C_r et I_z	168
B.2	Erreurs de validation : moyenne et maximale	169
B.3	Résultats d'identification des paramètres b_r et k_r , I_x	170
B.4	Erreur de validation : moyennes et maximales	170

Liste des tableaux

Première partie

Introduction, Motivations et État de l'Art

Introduction Générale

1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, les véhicules sont devenus de plus en plus indispensables au quotidien de l'Homme. Par conséquent, le parc automobile n'a cessé de croître et on compte aujourd'hui en France plus de 25 millions de voitures, soit environ deux voitures pour cinq personnes. Malheureusement, cette croissance est suivie par celle du risque d'exposition à un accident de la route. Afin d'y faire face, la sécurité routière n'arrête plus de se développer. En effet, les constructeurs équipent les véhicules, de plus en plus, de systèmes d'aide à la conduite tels que : airbags, ABS, ESP, ACC.... En plus de ces équipements plusieurs recherches se font actuellement dans les laboratoires dans le but d'assister le conducteur ou de contrôler partiellement le véhicule. On distingue principalement trois axes de recherches :

Le premier axe vise à percevoir l'environnement du véhicule afin de détecter les caractéristiques de la route, de reconstituer la géométrie tridimensionnelle de la chaussée qui permettent d'assurer un "bon" suivi de trajectoire ; ou d'alerter le conducteur en cas de présence d'un obstacle. Le deuxième axe consiste à contrôler le véhicule ou à aider le conducteur dans la prise de décision afin de maintenir le véhicule sur la voie, d'assurer la stabilité du véhicule et le confort du conducteur, de réguler les interdistances ou dans le cadre des assistances au freinage d'urgence pour éviter les chocs frontaux ou en réduire les conséquences. Le troisième axe consiste à localiser le véhicule et à développer des systèmes de communications véhicule-véhicule et véhicules-infrastructure afin d'assurer une navigation et une perception coopératives.

La connaissance du profil de la route est critique dans de nombreuses applications en phase de développement. Elle est en effet nécessaire pour le positionnement en absolu de la route, l'identification des zones accidentogènes, le calcul de vitesses limites, le maintien du véhicule sur la voie et la génération d'alarmes... Notons que les travaux de perception développés jusqu'à ce jour permettent uniquement un positionnement relatif du véhicule par rapport à la route. La localisation relative ne permet pas de passer à un positionnement absolu, ce qui influence directement la reconstruction 3D de l'environnement.

2 Contexte et Objectifs

L'objectif principal de la thèse est la reconstruction en absolu de la géométrie tridimensionnelle de la chaussée. Pour répondre à cet objectif deux méthodes sont développées.

La première méthode consiste à :

1. Localiser le véhicule en 3D et en absolu.
2. Faire le recalage pour obtenir la position du centre de la voie.
3. Associer à chaque positionnement les valeurs numériques des différents attributs (pente, devers, courbure et largeur) estimés par des observateurs.
4. Développement d'un algorithme qui permet de reconstituer la géométrie de la route en 3D.

La deuxième méthode a comme objectif l'estimation de la géométrie 3D de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu. Pour ce faire, le travail est décomposé en trois étapes :

1. Positionnement en absolu du véhicule par rapport à la route à l'aide d'observateurs.
2. Amélioration du positionnement relatif de la route par rapport au véhicule par la stéréovision.
3. Fusion des données provenant des deux sources précitées.

À partir des résultats obtenus, plusieurs applications robustes sont envisageables :

- Le développement d'assistances à la conduite comme la localisation absolue du véhicule par rapport à la route, le développement d'une cartographie en trois dimensions, la connaissance de la géométrie de la route au-delà de la portée des capteurs, l'amélioration des systèmes d'aide à la conduite existants (la détection d'obstacle, la localisation 2D et 3D, le contrôle latéral et longitudinal, le développement d'alarmes, la détection d'un risque de sortie de route...); ou encore la connaissance du réseau routier.
- La construction routière pour la détermination des modes de rectification et de mise en conformité des tracés routiers ou l'identification des zones accidentogènes.
- La dynamique automobile pour fournir les données d'entrée pour les modèles de simulation du comportement dynamique des véhicules ou de reconstruction cinématique des accidents, ou encore pour les simulateurs physiques de conduite.
- Optimisation de la consommation en connaissant le profil longitudinal de la route.

3 Organisation du document

Ce mémoire est organisé en quatre parties principales et trois annexes.

La première partie (Partie I : Introduction, motivations et état de l'art) contient la présente introduction générale qui précise le contexte et les objectifs de ces travaux de thèse et un chapitre (chapitre 1) qui dresse les motivations, un état de l'art des systèmes intelligents de transport, des principales méthodes de reconstruction de la géométrie de la route existantes et un aperçu rapide sur ce travail de thèse.

La deuxième partie (Partie II : Modélisation du véhicule et de la géométrie de la route) se compose de deux chapitres. Un premier, chapitre 2, présente les modèles linéaires et non-linéaires du véhicule. Ce chapitre débute par une esquisse générale des repères nécessaires pour décrire les mouvements du véhicule. Par la suite, une modélisation détaillée du véhicule est abordée. Le chapitre 3 est consacré à la modélisation de la géométrie de la route et aux définitions des différents attributs qui la constituent.

La Partie III (Observateurs pour l'estimation des variables d'état du véhicule et les attributs de la route et reconstruction 3D de la chaussée), représente le cœur de ce travail de recherche. Elle contient trois chapitres décrivant les deux méthodes de reconstruction de la géométrie de la route développées. Le premier chapitre de cette partie (chapitre 4) vise à faire un tour d'horizon

sur l'observabilité et les observateurs pour les systèmes linéaires et non linéaires. On donne en particulier une synthèse détaillée de l'observateur proportionnel intégral à entrées inconnues et du filtre de Kalman standard et étendu. Le deuxième chapitre, chapitre 5, a pour objet l'estimation des variables d'état du véhicule, des attributs de la route (pente, devers et courbure) et des mouvements de la caisse suspendue (roulis, tangage et pompage). On donne pour chaque estimation les résultats et les erreurs obtenus en simulation. Dans le chapitre 6, on détaille les deux méthodes de reconstruction de la géométrie de la route.

La quatrième et dernière partie de ce mémoire (Partie IV : Équipements, validation expérimentale et conclusions) est dédiée à un exposé général de l'instrumentation des véhicules expérimentaux utilisés et à la présentation des résultats de validation des observateurs et de la reconstruction de la route (chapitre 7). On termine cette partie par une conclusion générale.

Les trois annexes concernent une étude de l'observabilité du modèle non linéaire du véhicule (Annexe A). L'annexe B est consacrée aux méthodes et aux résultats d'identification des paramètres dynamiques et statiques du véhicule. L'annexe C illustre quelques résultats d'estimation.

Chapitre 1

Reconstruction de la route : état de l'art

Sommaire

1.1 Sécurité routière	8
1.1.1 Les niveaux de sécurité dans un véhicule routier	9
1.1.2 Les recherches menées dans le cadre de programmes : Assistance préventive	11
1.2 Reconstruction de la route : état de l'art	14
1.2.1 Méthodes de reconstruction du profil en long	15
1.2.2 Méthodes de reconstruction de la géométrie de la route	16
1.2.3 Observateurs pour la reconstruction des attributs de la route et les mouvements de la caisse	21

Ces dernières décennies ont vu la multiplication des recherches sur le développement des systèmes d'assistance à la conduite. Ces systèmes peuvent alerter le conducteur en amont d'un danger et vont, pour certains, jusqu'à corriger la trajectoire du véhicule lorsque celui-ci atteint, par exemple, des situations critiques pour la dynamique. Même si la plupart des systèmes disponibles fonctionnent sans perception de la route, les recherches ont montré que le contrôle de la stabilité du véhicule est fortement lié à la géométrie de la route [Tse99, Tse01, Seb08b, Mam02, Ryu04] et en particulier à la courbure, au devers et à la pente. Bien que ces attributs routiers soient faiblement variables dans le temps et lentement variables dans l'espace, et donc, *a priori*, possibles à placer sur une cartographie numérique, leurs recueils, au niveau de précision voulu et l'enregistrement engendrent des coûts prohibitifs.

Ce chapitre dresse un rapide état de l'art sur les travaux réalisés dans le développement des systèmes d'aide à la conduite en général et de reconstruction de la géométrie de la route en particulier. On donne dans la section 1.1, dans un premier temps, quelques statistiques sur la sécurité routière (accidents, blessés, tués...) au cours des dernières années. Dans un second

temps, on détaille les recherches sur la sécurité préventive dans le cadre de projets à travers le monde. La section 1.2 est consacrée aux différentes méthodes de reconstruction de la géométrie de la route par stéréovision et par fusion des données de plusieurs capteurs. On donne aussi dans la même section (section 1.2) les véhicules existants dédiés à la reconstruction de la géométrie de la route.

1.1 Sécurité routière

Depuis plusieurs décennies, la société française, comme toutes les sociétés industrialisées, enregistre sur ses routes plusieurs milliers de morts et plusieurs dizaines de milliers de blessés par an. Bien que le nombre de tués et d'accidents ait fortement baissé ces dernières années, il reste important (voir le tableau 1.1). La baisse du nombre d'accidents est essentiellement due aux engagements pris par le gouvernement français sur le retrait de points du permis de conduire, l'installation de radars de limitation de vitesse, le contrôle d'alcoolémie... Le tableau 1.1 montre les résultats quantitatifs du nombre de tués à 30 jours en France métropolitaine. La figure 1.1 montre le nombre de tués en Europe par million d'habitants en 2008.

TAB. 1.1 – Nombre d'accidents et de tués à trente jours en France métropole

Années	Accidents	Évaluation (%)	Blessés	Tués	Évaluation (%)
2004	85390	-5.4	108366	5593	-2.4
2005	84525	-1.0	108076	5318	-4.9
2006	80309	-5.0	102125	4709	-11.5
2007	81272	+1.2	103201	4620	-1.9
2008	74487	-8.3	93798	4275	-7.5

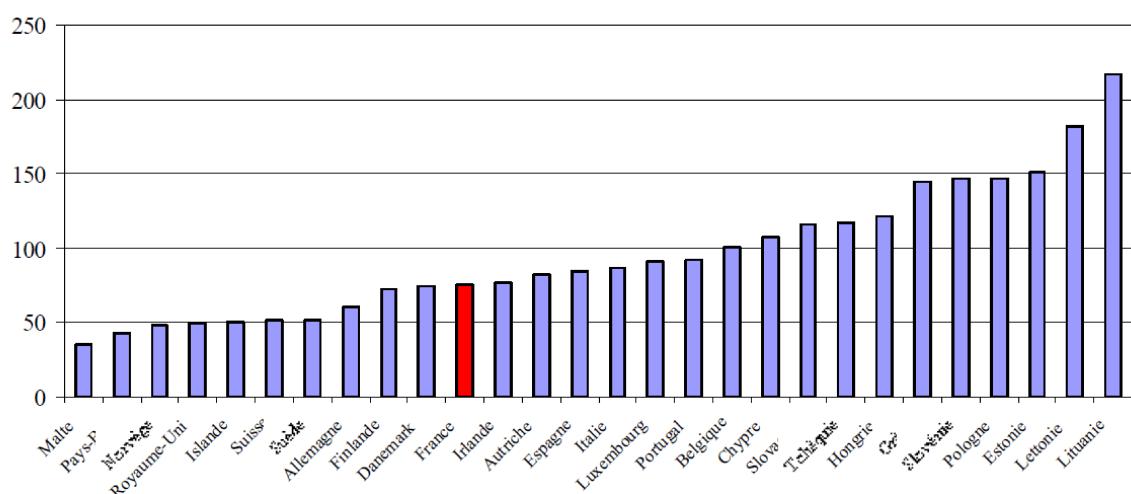


FIG. 1.1 – Les tués sur les routes en Europe par million d'habitants (année 2008).

Afin de diminuer le nombre et la mortalité des accidents, les constructeurs équipent actuel-

lement les véhicules neufs de plusieurs systèmes dits "d'assistance à la conduite" classés en deux catégories :

- **Systèmes passifs** : Dont le but est de diminuer les conséquences et la gravité des accidents, on cite par exemple, la caisse à déformation programmée, l'airbag, la ceinture de sécurité...
- **Systèmes actifs** : Dont le but est d'agir sur la contrôlabilité du véhicule afin de répondre plus rapidement et plus justement aux sollicitations du conducteur : nous parlerons d'éléments de sécurité active. On peut citer l'ABS¹, l'ESP², l'ACC³...

1.1.1 Les niveaux de sécurité dans un véhicule routier

Un schéma désormais classique (Fig. 1.2) présente de façon générale tout les aspects de la sécurité routière. Il y est différencié la sécurité active de la sécurité passive. La sécurité passive a été fortement développée depuis de nombreuses années par les constructeurs. Progressivement des systèmes actifs sont ajoutés pour limiter l'impact de l'accident. Désormais ces systèmes actifs permettent d'envisager une stratégie globale de prévention des accidents : c'est la sécurité active. Une autre description de la sécurité est proposée par [Mor03]. Les deux catégories précédentes (sécurité passive et active) sont décomposées en trois domaines qui sont : la sécurité primaire, secondaire et tertiaire. Au premier domaine est associée une échelle de temps relative à un impact (Fig. 1.3). Dans le cadre de la sécurité primaire, l'objectif est d'éviter l'accident grâce à une assistance apportée au conducteur. Cette dernière peut être qualifiée en fonction du degré d'urgence comme étant stratégique, tactique ou active.

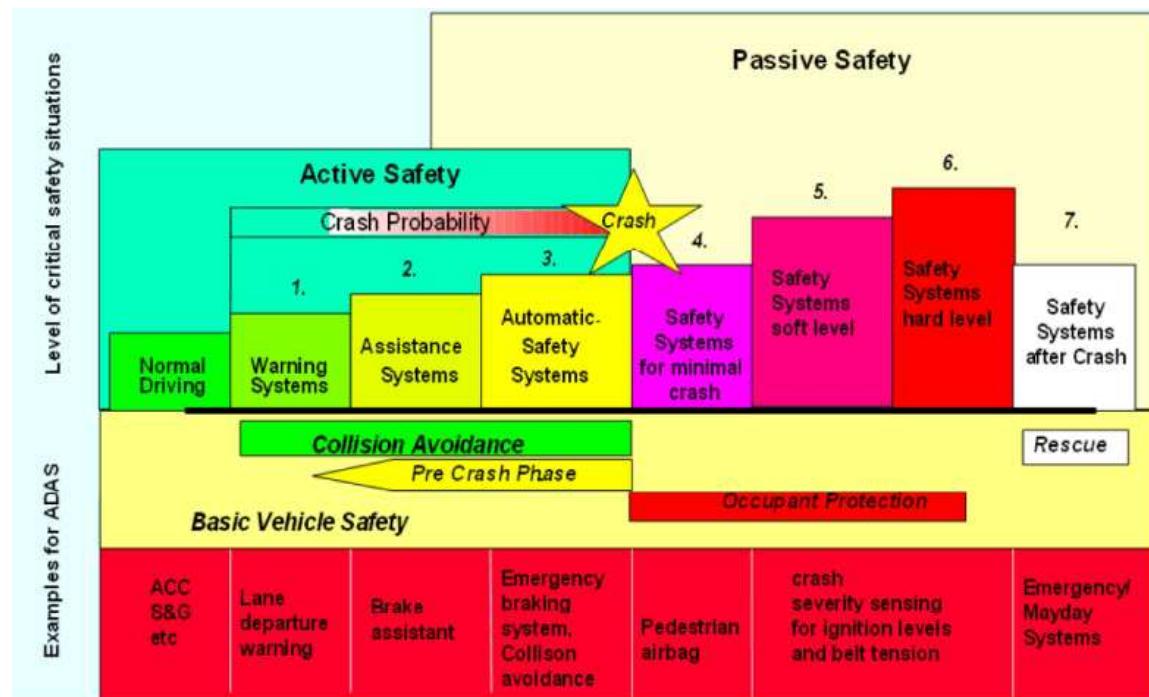


FIG. 1.2 – Approche intégrée de sécurité [Lii02]

¹ABS : Anti-lock Braking System

²ESP : Electronic Stability Program

³ACC : Adaptive Cruise Control

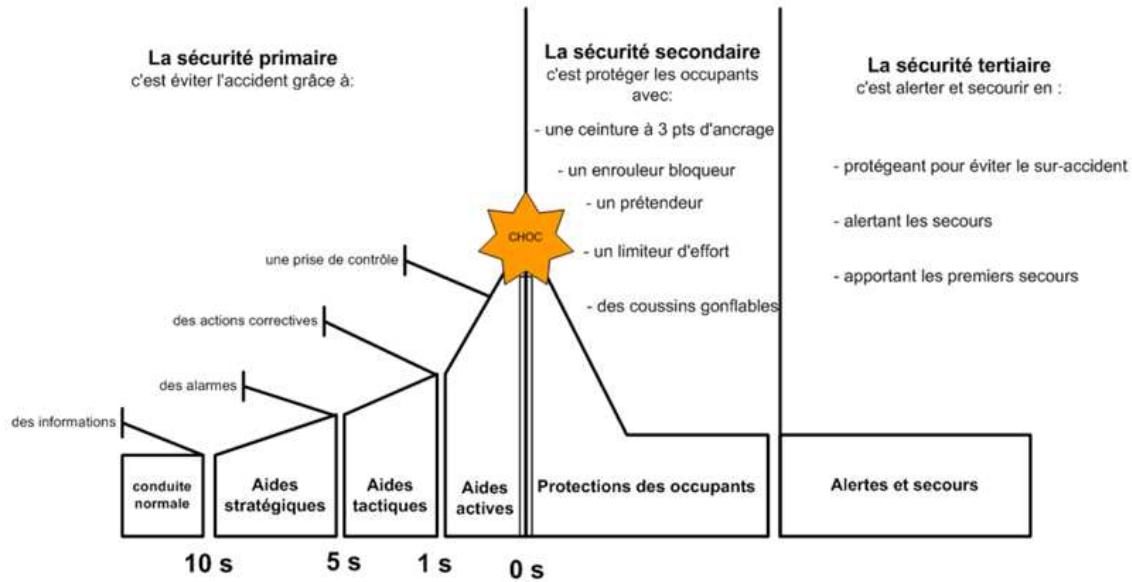


FIG. 1.3 – Les trois principaux domaines de la sécurité routière [Mor03]

La sécurité primaire

La sécurité primaire a pour objectif essentiel la prévention de l'accident. Elle vise donc à analyser l'ensemble des causes techniques et comportementales qui ont amené à l'accident routier, afin de lutter contre celles-ci. S'agissant du véhicule, elle vise à l'équiper de tous les instruments nécessaires pour éviter le choc (limitation de vitesse, feux, freinage, aide à la conduite,...). S'agissant du conducteur, elle tend à réformer son comportement, afin de le mettre en situation de prévenir la survenue de l'accident (par exemple le warning).

La sécurité secondaire

La sécurité secondaire n'a pas pour objectif d'éviter l'accident mais d'en réduire les conséquences. C'est la raison pour laquelle elle se concentre avant tout sur l'amélioration de la sécurité des véhicules. S'agissant des véhicules, il s'agit essentiellement de rendre l'habitacle moins agressif pour les passagers accidentés, voire d'en faire une protection pour ceux-ci. Il s'agit également de renouveler ou d'inventer les accessoires permettant de réduire les effets du choc (airbags, ceintures, détendeurs, etc...). Mais la sécurité secondaire concerne bien d'autres éléments plus anciens du véhicule, comme sa structure élaborée pour se déformer en cas de choc, afin de protéger l'habitacle.

La sécurité tertiaire

La sécurité tertiaire assure la gestion de l'après accident, et peut être décrite par les actions suivantes : protéger pour éviter le sur-accident, alerter les services de secours, apporter les premiers secours.

Notons que ces systèmes d'aide à la conduite, développés à ce jour par les constructeurs, agissent uniquement dans le cas d'une situation de conduite très dégradée. Ils présentent de nombreuses limites : les systèmes passifs et actifs existants ne peuvent pas agir dans le cas de sorties de route dues à une erreur de guidage et parfois à l'inattention du conducteur. Ou encore,

ces systèmes ne peuvent pas corriger la trajectoire du véhicule dans un virage si la perte de contrôle est due à une faible adhérence.

Malgré l'arsenal des dispositifs de sécurité primaire présent dans le véhicule, il reste donc nécessaire d'offrir au conducteur un système d'aide à la conduite lui proposant une évaluation des risques des situations de conduite avec, si possible, une anticipation suffisante.

Une étude statistique a montré qu'environ 90% des accidents de la route sont dus à une défaillance du conducteur. Ces défaillances sont réparties comme le montre la figure 1.4.

L'analyse de cette figure indique la possibilité de développer deux grands champs d'aide : le premier exprime la nécessité de fournir au conducteur une assistance à la perception et à l'évaluation (84% des défaillances de types :"perception, interprétation, évaluation") ; le second champ exprime la nécessité d'action additive ou supplétiue au conducteur (15% de types :"décision, action"). Les deux champs peuvent être regroupés sous la même approche qui est l'assistance préventive d'aide à la conduite. Les travaux réalisés dans le cadre de cette approche se limitent actuellement à quelques programmes et projets. Nous présentons ci-dessous les plus remarquables à travers le monde.

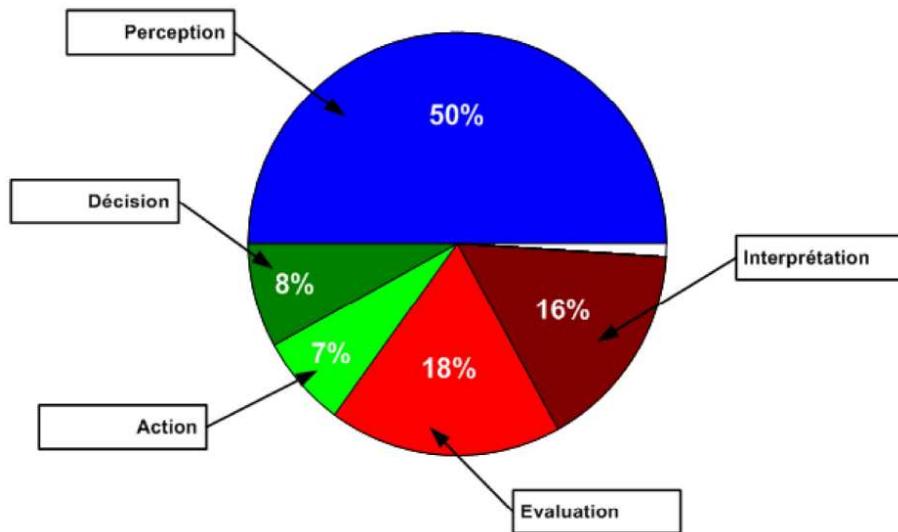


FIG. 1.4 – Défaillance humaine - Source CCFA [Ccf04]

1.1.2 Les recherches menées dans le cadre de programmes : Assistance préventive

Les recherches sur les aides à la conduite dans le cadre d'assistances préventives ont débuté il y a plus de trente ans. Un peu partout à travers le monde.

Les Etats-Unis se sont depuis longtemps engagés dans des recherches concernant le concept d'autoroute automatisée et sa réalisation pratique. Parmi les grands programmes NCHRP⁴ qui

⁴NCHRP : National Cooperative Highway Research Program

date des années 1960, ITS⁵ et le programme PATH⁶ en 1988, IVHS⁷, TCRP⁸ (1992), IVI⁹ en 1998. Les recherches dans ces programmes portent essentiellement sur une approche de type “autoroute automatisée”, où les systèmes de communication inter-véhicules et véhicules-environnement, ainsi que les systèmes de guidage automatique, occupent une place prépondérante. L’objectif dans ce cas est souvent d’assister le conducteur en le déchargeant de certaines tâches. À titre d’exemple, les objectifs d’IVI étaient :

- Prévention de collisions arrière ;
- Prévention des collisions lors des changements de voie ;
- Prévention contre les changements de voie non intentionnelle ;
- Amélioration de la visibilité ;
- Amélioration de la stabilité du véhicule ;
- Suivi de l’état physique du conducteur ;
- Prévention des collisions aux intersections.

Au Japon, les objectifs de la recherche sont tout à la fois ciblés sur l’équipement du véhicule que sur l’aménagement de l’infrastructure routière. Nous pouvons citer ARTS¹⁰- 1987/1990, ASV I¹¹ (1991/95), ASV II (1996-2000), SSVS¹² depuis les années 1990. Ils visent plutôt à aider le conducteur, en tenant ce dernier informé sur l’état de son véhicule, sur celui du réseau routier et sur les conditions de circulation de son parcours. Ces travaux, pilotés par les constructeurs automobiles, concernent des objectifs à plus court terme que ceux poursuivis dans le cadre des programmes américains. Les projets en cours ont été regroupés en 1996 au sein du programme ITS (Intelligent Transport Systems). Ce programme se compose de 8 groupes d’actions :

- Systèmes d’information et de navigation routière ;
- Systèmes de péage électronique ;
- Assistance pour une conduite sûre ;
- Optimisation de la gestion du trafic ;
- Amélioration de l’offre de transport public ;
- Amélioration des transports de marchandises ;
- Aide aux déplacements des véhicules d’urgence.

L’Europe a mis en place une stratégie communautaire en lançant RTI¹³, équivalent européen de ITS, PROMETHEUS¹⁴ (1986-1995), DRIVE¹⁵ (1988-1991). Ces programmes, qui regroupent tous les constructeurs automobiles européens et les laboratoires de recherche publics, ont pour objectifs d’améliorer, entre autres, le confort des véhicules, la fluidité du trafic, la consommation d’énergie, l’influence sur l’environnement et la capacité à éviter les accidents. Tous les programmes communautaires de recherche et développements successifs ont intégré au moins un axe

⁵ITS : Intelligent Transportation Systems

⁶PATH : Partners for Advanced Transit and Highway systems

⁷IVHS : Intelligent Vehicle Highway Systems

⁸Transit Cooperative Research Program

⁹Intelligent Vehicle Initiative

¹⁰ARTS : Advanced Road Transportation Systems

¹¹AVS : Advanced Safety Vehicle

¹²SSVS : Super Smart Vehicle System

¹³RTI : Road Transport Informatics

¹⁴PROMETHEUS : PROgramme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety

¹⁵DRIVE : Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe

dédié exclusivement à l'amélioration de la sécurité dans les transports.

Il faut noter que les problématiques de transports intelligents sens large : optimisation des réseaux de transports, assistances à la conduite, télématique routière et facteurs humains, ont continué à occupé un place prépondérante dans l'ensemble des programmes cadres communautaires et ce jusqu'au 7ème PCRD. Rappelons que le programme précurseur, à l'échelle mondiale, a été PROMETHEUS. Il reste aussi, le programme le plus ambitieux mené à ce jour, avec un budget total de 749MF. Mené entre 1987 et 1995 sous l'égide de l'Union Européenne, PROMETHEUS a réuni des constructeurs automobiles (Rolls Royce, Renault, PSA, BMW, Daimler-Benz, Porsche, Volkswagen, Alfa Romeo, Fiat, Saab, Volvo, etc.), des équipementiers (Siemens Automotive S.A., TRW, Valeo Electrical Systems, Knorr Bremse, etc.) et des centres de recherche et des universités (Linköping University, Université Di Roma "La Sapienza", École Nationale Supérieure des Mines De Paris, Deutsche Luftraum Technick, etc).

Le but déclaré de ce programme a été la création de concepts et de solutions qui vont ouvrir le chemin vers un système de trafic routier économiquement plus efficace et ayant un impact réduit sur l'environnement tout en assurant un degré élevé de sécurité [Eur97]. La vision de ce programme est représentée sur la Figure 1.5.



FIG. 1.5 – Vision PROMETHEUS d'un trafic futur sûr et efficace.

Les travaux de recherche et développement dans ce programme ont été scindés en deux volets, industriel et fondamental [Kan87]. Plusieurs véhicules prototypes ont été construits durant ce programme.

Remarque : *Malgré cet achèvement exceptionnel, les résultats obtenus dans PROMETHEUS n'ont pas débouché sur des produits commerciaux. Ceci est principalement dû à la faible avancée*

des techniques de calcul embarquées et à l'absence des composants clefs à des prix compétitifs pour l'industrie automobile comme, par exemple, les composants capteurs. Néanmoins, ce programme a ouvert le chemin à d'autres projets sur les systèmes intelligents de transport, qui ont bénéficié de meilleures dispositions technologiques.

Parallèlement à ces programmes communautaires, chaque état poursuit sa politique de recherche. En France, plusieurs ministères et organismes d'état regroupent leurs aides dans le cadre du PREDIT¹⁶ (1990-1994) dont l'une des principales missions a été et sera encore de favoriser l'élaboration de nouvelles fonctions sécuritaires grâce à une approche globale du système "véhicule - conducteur - infrastructure". Depuis, PREDIT a été décliné en PREDIT II et PREDIT III.

Les développements dans le domaine des transports intelligents ont suivi approximativement le même parcours partout dans le monde. L'état actuel dans les transports intelligents au Japon est résumé par les auteurs de [Bru05]. Une synthèse comparative des systèmes intelligents de transport aux États-Unis et au Japon a été réalisée dans [Adi03]. Cette synthèse évoque les visions nationales et l'intégration de ces systèmes à l'environnement socio-économique, les facteurs de blocage et les leviers à l'innovation aussi bien que les processus d'émergence technologique nationaux. Les technologies clefs de l'innovation en transport pour le futur en Europe sont dévoilées dans [The05].

1.2 Reconstruction de la route : état de l'art

La reconstruction de la géométrie de la route est un élément indispensable pour la mise en place des travaux de recherche sur la sécurité préventive. En effet, les travaux développés dans [Tse99, Tse01, Mam02, Seb08b, Ryu04] ont montré que la reconstruction du devers de la route à chaque instant est indispensable au contrôle latéral du véhicule, au calcul de vitesse limite dans les virages ou au développement d'alertes. Pour le contrôle longitudinal, la distance de freinage est limitée par l'angle de la pente. En perception [Lab03, Lab05, Per08], la détection d'obstacle dans l'environnement du véhicule nécessite la connaissance de la pente et du devers de la route etc.

D'un point de vue général, la caractérisation géométrique tridimensionnelle de la chaussée permet de développer ou améliorer plusieurs applications relatives à quatre principaux domaines que sont :

- Le développement d'assistances à la conduite :
 - la localisation absolue du véhicule par rapport à la route ;
 - le développement d'une cartographie en trois dimensions (3D) ;
 - la connaissance de la géométrie de la route au-delà de la portée des capteurs ;
 - l'amélioration des systèmes d'aide à la conduite existants tel que : la détection d'obstacle, la localisation 2D et 3D, le contrôle latéral et longitudinal, développement d'alertes... ;
 - la connaissance du réseau routier.
- La construction routière :
 - la détermination des modes de rectification et de mise en conformité des tracés routiers ;
 - l'identification des zones accidentogènes par rapport à la géométrie de l'infrastructure.
- La dynamique automobile en fournissant les données d'entrée (assiette instantanée du véhicule) :

¹⁶PREDIT : Programme de REcherche et d'Innovation dans les Transports terrestres

- pour les modèles de simulation du comportement de la dynamique des véhicules ;
- pour les modèles utilisés en reconstruction cinématique des accidents ;
- pour les simulateurs physiques de conduite.
- L'optimisation de la consommation par connaissance de la pente de la route.

A l'heure actuelle, peu de travaux sont développés dans le domaine de reconstruction du profil et de la géométrie de la route. Ils nécessitent souvent une instrumentation lourde et les résultats ne sont pas toujours satisfaisants. On donne ci-dessous les différentes méthodes développées à ce jour.

1.2.1 Méthodes de reconstruction du profil en long

Reconstruction du profil par la méthode APL

L'APL¹⁷ est un appareil de mesure, développé par le LCPC à la fin des années 1960 [Imi03], il permet de relever l'uni de la route. Son principe est le suivant :

Sur la route (voir figure 1.6), les élévations E_r dues aux irrégularités de la surface de la chaussée sont transmises au bras porte-roue par l'intermédiaire de la roue de mesure. Un capteur mesure l'angle β_r proportionnel à E_r , entre l'axe du bras porte-roue et l'axe de référence donné par le pendule inertiel. Une connaissance de la fonction de transfert du système APL permet facilement de calculer l'uni pour des longueurs d'ondes variant, selon la vitesse du véhicule, dans la plage 0.5 – 20m et 1 – 50m.

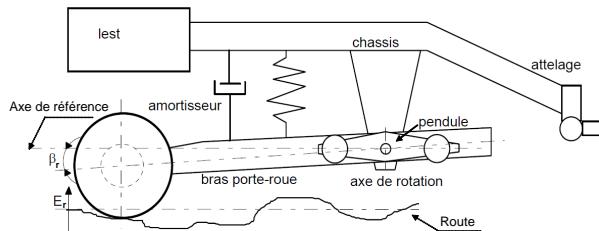


FIG. 1.6 – L'Analyseur de Profil en Long (APL) et son schéma de principe

Remarque : Le principe de cet appareil (APL) est valable uniquement pour les routes sans devers et sans pente. En effet, l'axe de référence du capteur inertiel varie aussi en fonction de la pente et du devers, voire aussi en fonction du mouvement vertical du véhicule, ce qui influe très fortement sur la reconstruction de l'uni.

Méthode inertielle

La méthode inertielle proposée en 1964 par General Motors, se fond sur deux capteurs : un accéléromètre et un capteur laser. Son principe de fonctionnement est le suivant [Imi03] : L'accéléromètre fournit, après une double intégration de l'accélération \ddot{Z}_a , la position verticale en absolu de la caisse, notée Z_a (cette double-intégration nécessite généralement une étape de

¹⁷APL : Analyseur de Profil en Long

filtrage passe-bas pour éliminer les bruits). Quant au capteur laser, il fournit la distance de la caisse par rapport à la chaussée, notée U_a . L'uni de la route est donné par la quantité $Z_a - U_a$.

Remarque : *Le résultat de reconstruction de l'uni de la route par cette méthode est uniquement valable pour les routes horizontales et planes.*

1.2.2 Méthodes de reconstruction de la géométrie de la route

On distingue, dans la littérature, deux méthodes principales de reconstruction de la géométrie de la route en trois dimensions : par vision artificielle (vision mono-caméra, stéréovision, etc.) et par fusion des données de plusieurs capteurs proprioceptifs ou extéroceptifs embarqués (Centrale inertielle, télémètres laser, GPS).

Reconstruction de la chaussée par la méthode de vision artificielle

L'objectif de ce processus de reconstruction est d'obtenir un modèle géométrique tridimensionnel de la route à l'avant du véhicule. Une telle reconstruction présente un intérêt dans la mesure où elle fournit des informations anticipatives sur la nature de la chaussée (amplitude des virages, courbures horizontale et verticale, etc.). Le comportement des véhicules obéissant à des modèles dynamiques connus, il sera dès lors possible d'en anticiper ou d'en contrôler l'état à venir.

La reconstruction 3D n'est pas en soit un processus de perception. Ce problème est d'ailleurs résolu sous certaines hypothèses [Dem90, Dem88]. Cependant, du fait que les processus de reconnaissance ne garantissent pas ni la précision ni la vraisemblance du résultat, la reconstruction 3D par vision artificielle souffrira de ces manques. De plus, les instabilités engendrées par les bruits de localisation dans l'image ou les éventuelles torsions de la route rendent problématique l'utilisation de ces méthodes.

Par ailleurs, lorsque plusieurs caméras sont utilisées dans un même système de vision, il est possible de mettre en œuvre des algorithmes de stéréovision qui fournissent des informations plus précises. De nombreux algorithmes ont été proposés en ce sens. Nous allons en donner un aperçu.

La vision monoculaire : L'utilisation d'une caméra permet, pour un coût relativement faible, d'accéder à une quantité suffisante d'informations sur le champ de vue. Cependant, comme une caméra ne fournit pas immédiatement des mesures sur l'environnement du véhicule, elle doit faire appel à des algorithmes de traitement d'images plus ou moins complexes pour réaliser la détection de la route.

Les méthodes développées pour obtenir une représentation 3D de la route par analyse d'image, utilisent divers types de modélisation. Ainsi, les techniques de reconnaissance s'appuyant sur un modèle issu d'une représentation 3D de la chaussée (avec approximations éventuelles comme les modèles hyperboliques [Cha91] ou clothoïdaux [Dic93]) peuvent déjà conduire à une reconstruction 3D de la route dans la mesure où l'on se satisfait de cette modélisation. Cependant il est des cas où il est indispensable de reconstruire plus précisément la géométrie de la route. On distingue deux approches :

- la reconstruction basée sur une seule image
- la reconstruction incrémentale.

La reconstruction fondée sur une seule image Cette technique consiste à déterminer la forme tridimensionnelle de la route en utilisant uniquement l'image courante. L'approche de référence est celle de Dementhon, de l'université du Maryland, précédemment citée [Dem88, Dem90]. On trouvera dans [Dem90] les résultats de cette modélisation. Trois hypothèses majeures sont faites dans cette approche :

- La première est le fait que la route soit de largeur constante L_r .
- La deuxième est que la route est sans dévers. Autrement dit, les bords droits et gauches de la route, distant de L_r , sont générés par un segment toujours horizontal (c'est-à-dire perpendiculaire au vecteur \mathbf{Z}_a du repère absolu).
- La dernière est la connaissance dans le repère capteur des valeurs de tangage et de roulis. Cette hypothèse est utilisée uniquement pour la reconstruction (l'implémentation), et non pour la modélisation.

Ce modèle donne alors une résolution théorique de la reconstruction tridimensionnelle de la forme de la route. Son problème majeur est la grande sensibilité aux bruits de mesures des bords de route dans l'image. Par ailleurs, cet algorithme reçoit comme paramètres d'entrée (à l'aide d'une centrale inertie par exemple) le roulis et le tangage. Le reste, la forme 3D de la route, est déduit par l'algorithme. Cet algorithme est donc extrêmement dépendant d'un autre capteur. Par la suite, Kanatani [Kan90] utilise le même principe de modélisation mais en exprimant les contraintes géométriques par des équations différentielles. Une minimisation conduit au lissage de la route reconstruite du fait du bruit engendré par le calcul de la dérivée des positions des points correspondants aux bords de la route. Une méthode utilisant un modèle simplifié similaire à celui de DeMenthon a été proposée au LASMEA [Cha99, Cha00]. Elle est basée sur le calcul des coordonnées 3D du milieu des segments décrivant la route à partir de la projection de leurs extrémités dans l'image. Ces points 3D sont ensuite ajustés à un modèle polynomial. L'approximation principale de la méthode est qu'un segment 3D virtuel de la route se projette sur une ligne de l'image, et que tous ces segments 3D sont parallèles et de même longueur. Ces approximations permettent d'éviter les calculs de dérivée et rend la méthode beaucoup plus robuste que les solutions présentées précédemment. Une étude de l'incidence des ces hypothèses est faite dans [Auf01b]. Guiducci, dans [Gui99b] propose une autre méthode qui a été implantée sur le véhicule expérimental MOBLAB et qui fonctionne à une cadence de 12 images par seconde.

Remarque : *L'approche de reconnaissance tridimensionnelle basée sur une image présente cependant l'inconvénient d'échouer lorsqu'un faux plat apparaît. En effet, les approches exploitant généralement une hypothèse de continuité des bords de la route dans l'image, cette situation rend impossible la reconstruction 3D de la route.*

Reconstruction incrémentale : Cette approche consiste justement à déterminer l'attitude tridimensionnelle de la chaussée en utilisant les images précédentes. La route est ainsi modélisée par une équation dont la mise à jour est alimentée par les détections (ou reconnaissances de la route) faites à l'instant présent mais aussi aux précédents.

Du fait que le modèle 3D est alimenté périodiquement en informations, cette méthode est beaucoup moins sensible à la présence de faux plats. En effet, un manque d'information à un instant donné (c'est-à-dire pour une image donnée) pourra probablement être compensée avec celles issues des images précédentes. Chausse propose, dans [Cha94], d'utiliser une modélisation polynomiale complexe pour reconstruire le profil 3D de la géométrie de la route. Cette modélisation

est réalisée à l'aide d'un filtrage temporel de Kalman. L'approche nécessite la connaissance du modèle d'évolution de la caméra et est donc sensible à la connaissance de l'état courant du véhicule.

L'approche développée par Dickmanns semble la plus abouti dans ce domaine [Dic88]. En effet, la reconnaissance de la chaussée utilise un modèle tridimensionnel de la route (tenant en compte à la fois les courbures horizontale et verticale). En fait, le modèle géométrique proposé est contenu dans le modèle de Dementhon [Bat95, Lak00]. Il s'agit d'un modèle de route "ruban" avec courbure verticale linéaire par morceaux et horizontale constante par morceaux. Le modèle 3D de la route est ainsi remis à jour de manière incrémentale, les paramètres se précisant au fur et à mesure de l'avancement du véhicule.

La stéréovision La stéréovision est une technique de vision fondée sur l'utilisation de plusieurs caméras (généralement deux), voir la figure 1.7. En combinant leurs différents points de vue, nous accédons à des informations de profondeur difficilement accessibles lorsqu'une unique vue est utilisée sans prendre d'hypothèses fortes.

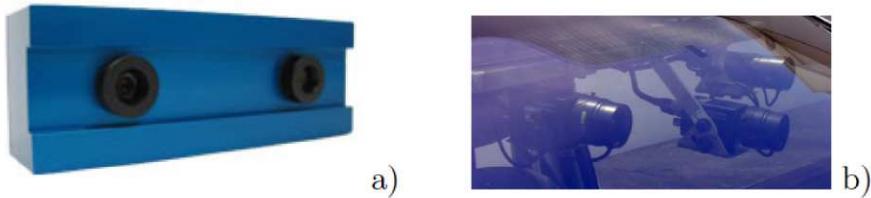


FIG. 1.7 – Deux types de systèmes stéréoscopiques. *a)* Un capteur intégré. *b)* Des caméras embarquées dans un véhicule d'essais. Les deux caméras positionnées sur les bords forment un capteur stéréoscopique.

Pour détecter la surface de la route, la majorité des approches la modélise comme un plan (cette hypothèse est généralement connue sous le nom de "monde plan"). L'estimation peut être réalisée à l'aide d'une régression planaire, l'optimisation de ce problème étant réalisée par une technique des moindres carrés [Fra00]. Cependant, la robustesse d'une telle approche n'est pas assurée dans le cas d'une scène complexe, qui contient beaucoup de pixels n'appartenant pas à la surface de la route. Pour résoudre cette problématique, Geronimo et al. [Ger07] proposent de supprimer l'influence de ces "outliers" par l'utilisation de l'algorithme RANSAC¹⁸. Le plan finalement détecté est celui pour lequel le nombre d'"inliers" est maximum.

D'autres méthodes [Ned04a, Ned04b] consistent en la projection 3D des points situés à courte distance pour estimer le tangage du système stéréoscopique par rapport à la surface de la route. La courbure est ensuite construite avec les seuls points lointains, sous forme d'une cloxoïde. L'approche v-disparité proposée par Labayrade et al [Lab03] permet quant à elle de réduire le problème de détection de plans à une détection de droite, en projetant avec accumulation les points de l'image de disparité le long des lignes. Le plan de la route est alors comme "vu de côté", et apparaît comme une droites, facilement détectée par une variante de la transformée de Hough. Plus récemment Benmansour dans [Ben08, Ben07] a proposé une autre méthode de reconstruction 3D et la localisation relative du véhicule par rapport à sa voie de circulation. Les paramètres d'une surface 3D intégrant les profils horizontal et vertical de la voie de circulation sont estimés à partir des bords de voie.

¹⁸RANSAC : RANdom SAmple Consensus

Remarques : La plupart des algorithmes couramment utilisés pour la détection de la route visent à trouver dans l'image un ensemble de points connus, appartenant à la route, généralement les marquages gauche et droit. Dans ce cas, une première étape consiste à extraire des primitives pouvant appartenir aux marquages, pour ensuite vérifier que celles-ci correspondent effectivement au modèle de marquage recherché afin de remonter à la géométrie horizontale de la route (courbure et largeur) par l'approche de régression planaire et à la géométrie longitudinale parfois.

La vision artificielle ne permet que la reconstruction de la géométrie de la route dans le repère relatif aux capteurs embarqués. Donc, chaque mouvement de la caisse du véhicule, influe très fortement sur les résultats de la reconstruction. En effet, avec cette méthode, il est impossible de distinguer le freinage du véhicule de la montée de la route. Ou encore, il est impossible de calculer en absolu avec précision, la distance du véhicule à un obstacle, dans le cas d'une route non plane.

Cette méthode est aussi très fortement liée aux résultats de détection des marquages des bords gauche et droit et aux conditions de visibilité géométrique (virages, côtes, obstacles routiers...) et atmosphérique (brouillard, pluie, neige...).

Méthode par fusion des données de capteurs proprioceptifs

Le principe de cette méthode est de fusionner les données de plusieurs capteurs proprioceptifs embarqués sur le véhicule, tels que : les données d'une centrale惯性的, d'un ou plusieurs GPS et de plusieurs télémètres lasers...

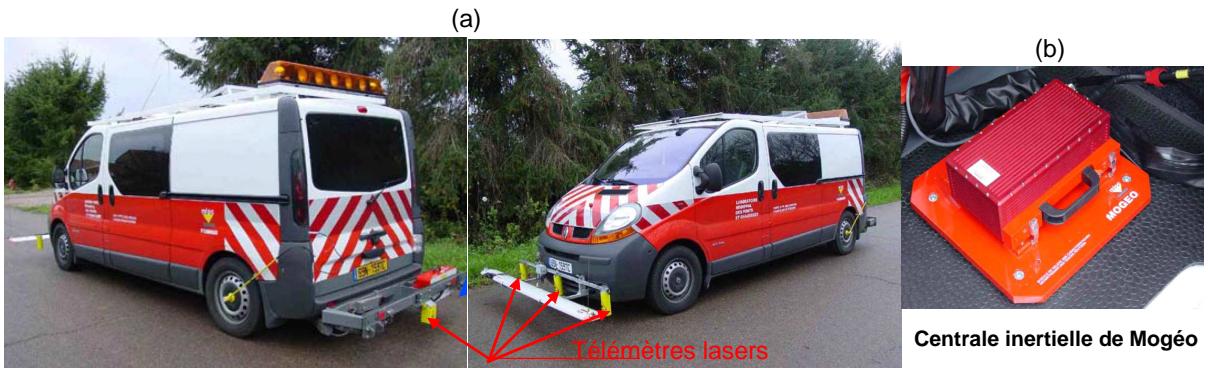


FIG. 1.8 – Le véhicule MOGéO dédié à la reconstruction de la géométrie de la route.

Par exemple, dans le cas de MOGéO (voir la Fig. 1.8), le véhicule est équipé d'une centrale惯性的 de hautes performances, et de quatre télémètres lasers. La centrale惯性的 fournit la combinaison du plan de la route et celui du véhicule. Les quatre télémètres lasers permettent de calculer le plan du véhicule, une soustraction entre les deux plans permet d'obtenir celui de la route, donc le devers et la pente. La courbure de la route est calculée à partir des données de la centrale惯性的.

En France, les véhicules, dédiés à la reconstruction de la géométrie de la route par fusion des données de capteurs proprioceptifs, sont environ au nombre de cinq (MOGéO, VANI, AMAC, NAVETEQ, ARAN).

Cette méthode de reconstruction de la géométrie de la route donne des résultats meilleurs que la précédente (méthode par vision artificielle). Néanmoins, elle présente aussi quelques inconvénients :

- Le premier inconvénient réside au niveau des coûts. En effet, cette méthode nécessite plusieurs capteurs de haute technologie (quatre télémètres lasers, centrale inertie...) qui ne sont pas disponibles sur les véhicules standards. Elle nécessite aussi que les données brutes des capteurs soient précises, fiables et non bruitées, ce qui augmente très rapidement les coûts des capteurs qui satisfont ces contraintes.
- Une centrale inertie fournit un renseignement sur la trajectoire du véhicule (l'itinéraire) mais pas sur la courbure de la route. Il est donc nécessaire de la corriger, particulièrement dans le cas des virages, à l'aide d'une caméra frontale par exemple.
- Un angle de cap non nul entre le véhicule et la route, engendre une erreur sur la reconstruction de la pente et du devers, respectivement de l'ordre de $\theta_0(1 - \cos(\Psi))$ et $\phi_0(1 - \cos(\Psi))$, où θ_0, ϕ_0 sont dans l'ordre les angles réels de la pente et le devers de la route. Ψ est l'angle de cap relatif.
- Les résultats de positionnement sont fortement liés au signal GPS, or ce signal est parfois médiocre comme le montre la figure 1.9.



FIG. 1.9 – Résultats de tests de localisation par GPS-RTK, à la Défense-France (a) et à Guyancourt-France (b)

Notre objectif à travers cette thèse est de lever ces limites. En proposant une nouvelle méthode fiable, robuste et à bas coût de numérisation et d'estimation 3D de la géométrie de la route. Cette méthode consiste à localiser en trois dimensions le véhicule par un estimateur IMM (Interaction Multi-Modèle) développé au LIVIC [Ndj07, Ndj08]. Et, connaissant l'écart latéral du véhicule par rapport à la route, on en déduit les coordonnées du centre de la voie, auxquelles on associe les valeurs des différents attributs (pente, devers, courbure et largeur) pour former une carte numérique de la géométrie 3D de la route. Ces données seront ensuite utilisées pour la reconstitution de la géométrie en trois dimensions.

Techniquement, dans un premier temps, par application du filtre de Kalman étendu (EKF) et de l'observateur proportionnel intégral sur les modèles dynamiques du véhicule, on estime la pente, le devers et la courbure de la route. Dans un second temps, un algorithme d'estimation de la largeur de la route par une caméra frontale développé au LIVIC [Lab03, Ben07, Ben08] sera utilisé. Les résultats de validation seront présentés dans le chapitre 7.

Dans le chapitre 6, on proposera une autre méthode de reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule en 3D, dans le repère absolu et en temps réel, dans le but d'alerter le conducteur suffisamment en avance en cas de nécessité. Cette méthode est fondée sur la fusion

des données de reconstruction de la route dans le repère relatif (obtenues par stéréovision) avec les données d'observateurs. Les données d'observateurs servent à calculer la matrice de passage du repère relatif (repère lié aux capteurs embarqués) au repère absolu. Cette matrice est fonction de la pente et du devers de la route, du roulis, du tangage, du lacet et du pompage du véhicule

Le problème majeur de la reconstruction de la géométrie de la route par stéréovision est qu'elle se limite à une reconstruction dans le repère relatif aux capteurs embarqués. Cela engendre des erreurs non négligeables. En effet, le système stéréoscopique est fixé sur la partie suspendue du véhicule (la caisse) ; donc chaque mouvement de celle-ci implique une variation de la position et de l'inclinaison du capteur stéréoscopique et influe donc sur les résultats de reconstruction.

Nous proposons dans notre méthode d'estimer ces différents mouvements de la caisse suspendue (roulis, tangage et pompage), les attributs de la route et l'angle de cap relatif par le biais d'observateurs, puis de remonter aux variations de la position et des inclinaisons du capteur stéréoscopique, ainsi qu'à la matrice de passage du repère relatif au repère absolu. Une fois la matrice de passage calculée, une simple multiplication matricielle permet de ramener les données de reconstruction de la géométrie de la route du repère relatif au repère absolu.

Techniquement, les mouvements de la caisse suspendue sont estimés par application des observateurs LPV (linear parameter varyings) et proportionnel intégral sur les modèles cinématique et dynamique du véhicule. Les détails des estimations sont donnés dans le chapitre 5.

1.2.3 Observateurs pour la reconstruction des attributs de la route et les mouvements de la caisse

De nombreux efforts des recherches sur les systèmes d'aide à la conduite visent à développer des capteurs virtuels (observateurs) à bas coût, dans le but d'estimer les variables d'état du véhicule et les attributs de la route. On s'intéresse dans cette partie aux travaux réalisés dans le but de l'estimation de ces attributs et des mouvements de la caisse.

Reconstruction du dévers et de la pente de la route

Les auteurs dans [Ryu04, Ryu04b, Bae01] proposent une méthode d'estimation de la pente et du devers de la route par application de l'observateur de Luenberger sur le modèle bicyclette du véhicule. Ils utilisent les données d'une centrale inertie et les mesures de quatre GPS (deux GPS placés sur l'axe longitudinal pour estimer la pente et deux sur l'axe transversal pour estimer le devers). On note que le résultat obtenu est fortement lié à la qualité du signal GPS. Il faut signaler aussi que les coûts nécessaires pour faire fonctionner l'estimateur sont relativement élevés. Dans [Sen07], une autre méthode a été développée pour la reconstruction de la dynamique latérale et l'angle de devers. Elle utilise un observateur proportionnel intégral sur le modèle du véhicule. Les auteurs ont considéré que l'angle de roulis est mesurable, mais cette hypothèse est loin d'être raisonnable parce que, à l'heure actuelle, la mesure de cette variable est très difficile. L'estimation des états dynamiques du véhicule et en particulier, la reconstruction de la pente de la route en utilisant un observateur différentiel fondé sur la méthode des modes glissants d'ordre 2, a été l'objet des travaux de [Rab05].

Dans le but de lever ces limites, on propose dans le chapitre 5, une nouvelle méthode d'estimation de ces deux attributs (pente et devers) à l'aide de deux observateurs placés en cascade. La pente de la route sera estimée par application du filtre de Kalman étendu sur le modèle non linéaire du véhicule en utilisant les données de l'ABS et de l'ESP, disponibles sur la plupart des

véhicules récents produits en Europe. Quant au devers de la route, il sera estimé par l'application de l'observateur proportionnel intégral à entrées inconnues (IUPIO) appliqué au modèle bicyclette du véhicule. Cet observateur utilise les résultats du premier estimateur (filtre de Kalman étendu) et les données de l'ESP. Une démonstration de convergence de l'ensemble des deux observateurs est donnée dans le chapitre 5 et des tests de validations dans le chapitre 7.

Remarques : Dans des nombreux travaux, la route est considérée comme plane, sans devers. Cette hypothèse peut être considérée comme une perte d'une marge de sécurité. En effet, les courbures de la route sont généralement conçues avec un angle d'inclinaison latérale (devers) non nul afin de compenser une partie de l'accélération latérale du véhicule (l'angle de devers a une influence directe sur la dynamique du véhicule et sur la mesure de l'accélération latérale). Cependant, il est également bien connu que certains points noirs présentent un devers inversé, en particulier en fonction des contraintes géographiques. Pour réduire autant que possible les erreurs de modélisation et d'estimation de l'état du véhicule et pour bien contrôler sa stabilité, il est donc important de connaître cet angle de devers subi par le véhicule [Tse99, Seb08b]. A titre d'exemple, la vitesse maximale dans un virage n'est pas seulement limitée par la courbure du virage mais aussi par l'angle du devers.

Il faut aussi noter que d'autres attributs telle que la pente ont également des effets sur la dynamique de véhicule. La connaissance de ces attributs de la route qui sont malheureusement difficiles à mesurer avec les technologies de capteurs à faible coût utilisées dans l'industrie automobile, peut être très bénéfique au développement de systèmes d'aide à la conduite.

Reconstruction des mouvement de la caisse : roulis et tangage

Durant les dernières années, on peut noter quelques efforts sur l'estimation des angles de tangage et de roulis [Tse07, Sen07]. Dans [Sen07], l'auteur a développé un observateur PI dans le but d'estimer l'angle de roulis du véhicule et le dévers de la route. Il a considéré que le signal résultant de l'angle de roulis et de dévers est mesurable. Cette hypothèse est loin d'être réaliste car, à ce jour, il n'est toujours pas facile de le mesurer avec les capteurs existants. Dans [Tse07], une approche fondée sur la théorie des modes glissants a été utilisée pour estimer les angles de tangage et de roulis. L'auteur a considéré que ces variables oscillent autour d'une constante de référence fixée à l'avance. Cette hypothèse est peu convaincante : en réalité les variables de roulis et tangage varient sur un intervalle mais pas autour d'une valeur constante.

Dans le chapitre 5, afin de surmonter ces hypothèses, on propose une nouvelle méthodologie de conception d'estimateurs de l'angle de roulis et de tangage. La première variable (angle de roulis) est estimée par l'intermédiaire d'un observateur proportionnel intégral appliqué au modèle bicyclette linéaire du véhicule. La deuxième variable (l'angle de tangage) est reconstruite par une approche de modélisation multi-modèles, latéral et vertical. Lorsque le premier modèle est utilisé, l'angle de tangage est estimé par l'application de l'observateur LPV (linéaire à paramètres variants) sur le modèle cinématique du véhicule. Dans le deuxième cas, l'angle de tangage est reconstruit par la résolution d'un système différentiel de la dynamique verticale du véhicule. La stabilité de l'observateur est démontrée mathématiquement et les résultats d'estimation obtenus seront comparés, dans le chapitre 7, aux signaux expérimentaux enregistrés sur un véhicule prototype.

Deuxième partie

Modélisation du Véhicule et de la Géométrie de la Route

2

Modélisation du véhicule et identification des paramètres

Sommaire

2.1	Mouvements du véhicule	26
2.1.1	Définition des repères utilisés	26
2.1.2	Relation de changement de repère	28
2.2	Modélisation du véhicule	31
2.2.1	Principes fondamentaux de la dynamique	31
2.2.2	Calcul du moment dynamique H_O	32
2.2.3	Expression de l'accélération	32
2.2.4	Modèle de braquage	33
2.2.5	Forces extérieures agissant sur le véhicule	33
2.2.6	Les glissements longitudinaux et transversaux	42
2.2.7	Moments de la caisse suspendue et moment de lacet	46
2.2.8	Modélisation de la suspension	49
2.2.9	Bilan des forces	50
2.3	Modèles simplifiés du véhicule	51
2.3.1	Modèle non linéaire à quatre roues	51
2.3.2	Modèle linéaire type Bicyclette	52
2.3.3	Modèle vertical de la suspension	54
2.4	Identification des paramètres dynamiques	56
2.5	Validation du modèle du véhicule	56
2.6	Conclusions	60

Afin de concevoir une méthode d'estimation du vecteur d'état, des entrées inconnues et d'identification/poursuite des paramètres, utilisant des observateurs, il est indispensable d'établir en premier lieu un modèle dynamique du véhicule. Le véhicule est un élément relativement

complexe à étudier, dans la mesure où c'est un système fortement non-linéaire, dont quelques paramètres (masse, adhérence, les raideurs pneumatique...) peuvent varier.

Dans notre cas, l'objectif est de présenter le développement d'un modèle réaliste en accord avec l'étude qu'on se propose de faire. Il fait intervenir de nombreux éléments mécaniques (caisse suspendue, suspension, roues, géométrie de la route). Chaque bloc est modélisé séparément, et on donne par la suite les interactions entre les blocs. Avec une telle méthode, nous percevons très rapidement le mode de fonctionnement du système considéré, tant au niveau de chaque bloc que dans sa globalité et les modifications sont alors plus aisées.

Le véhicule fait intervenir six mouvements principaux : trois translations selon les trois axes : longitudinal, latéral et vertical, ainsi que les rotations autour de ses trois mêmes axes. Ces mouvements sont présentés dans la section 2.1.

Une modélisation détaillée de la dynamique longitudinale et latérale du véhicule est abordée dans la section 2.2. Nous présentons par la suite un modèle de la dynamique verticale (modèle de la suspension) dans la section 2.2.8.

Les différentes forces agissant sur le véhicule sont modélisées dans la section 2.2.5. Dans un premier temps, nous présentons les forces de résistance au roulement, les forces aérodynamiques et les forces verticales. Dans un second temps, nous abordons les forces de contact pneumatique chaussée, nous détaillons en particulier le modèle de forces de Pajecka et de Dugoff et nous présentons une comparaison entre les deux.

Dans la section 2.3, on donne les différents modèles simplifiés dérivés du modèle global non linéaire et leurs domaines de validité. Ces différents modèles sont le modèle non linéaire à quatre roues, très largement utilisé dans la simulation, le modèle bicyclette linéaire et le modèle vertical de la suspension.

Les deux sections 2.4 et 2.5 sont consacrées respectivement à l'identification des différents paramètres et à la validation du modèle. Nous terminons ce chapitre par quelques conclusions (section 2.6).

2.1 Mouvements du véhicule

Un véhicule léger est caractérisé par trois mouvements de translation et trois mouvements de rotation. Les mouvements de translations sont :

- **Avance** : translation selon l'axe longitudinal \mathbf{X}_v .
- **Ballant** : translation suivant l'axe transversal \mathbf{Y}_v .
- **Pompage** : translation selon l'axe vertical \mathbf{Z}_v .

Les mouvements de rotation sont :

- **Roulis** : rotation ϕ_v autour de l'axe \mathbf{X}_v .
- **Tangage** : rotation θ_v autour de l'axe \mathbf{Y}_v .
- **Lacet** : rotation ψ autour de l'axe \mathbf{Z}_v .

Ces trois rotations sont connues sous le nom des angles d'Euler, la rotation selon \mathbf{Z}_v et souvent appelée "angle de cap", l'angle de roulis est ressenti en particulier dans les virages et le mouvement de tangage est causé principalement par le freinage ou l'accélération du véhicule. la figure 2.1 montre ces différents mouvements de translation et de rotation.

2.1.1 Définition des repères utilisés

Pour décrire correctement les mouvements et les équations dynamiques du véhicule, nous avons besoin de plusieurs référentiels (Fig. 2.2, Fig. 2.3 et Fig. 2.4) :

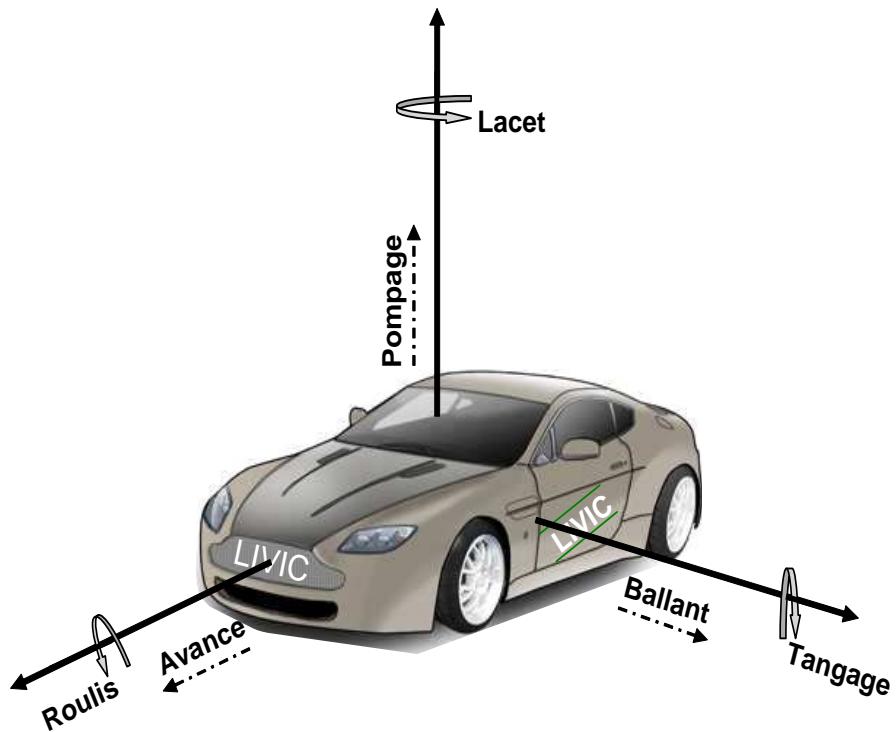


FIG. 2.1 – Les six mouvements du véhicule.

Le repère sol (absolu)

Le repère sol (\mathbf{R}_a) est défini de façon classique : l'axe \mathbf{Z}_a est vertical et orienté vers le haut, les axes \mathbf{X}_a et \mathbf{Y}_a forment avec \mathbf{Z}_a un trièdre direct. Il est supposé galiléen.

$$\mathbf{R}_a = (\mathbf{O}_a, \mathbf{X}_a, \mathbf{Y}_a, \mathbf{Z}_a).$$

Le repère véhicule

Ce repère est considéré comme un repère intermédiaire lié au plan de la route, son origine est la projection du centre de masse du véhicule sur le plan de la route. L'axe \mathbf{Z}_v est normal au plan de la route, les axes \mathbf{X}_v et \mathbf{Y}_v définissant ce plan sont tels que \mathbf{X}_v soit dans la direction longitudinale du véhicule. Ce repère exprime le mouvement de lacet du véhicule et les variations de pente et de devers.

$$\mathbf{R}_v = (\mathbf{O}_v, \mathbf{X}_v, \mathbf{Y}_v, \mathbf{Z}_v)$$

Les repères liés aux pneumatiques \mathbf{R}_{pi} et \mathbf{R}_{cr_i}

Repères pneumatiques \mathbf{R}_{pi} : Il y en a un par roue : $i = 1, \dots, 4$. Chaque repère lié au pneumatique a pour origine le point de contact sol-roue. L'axe \mathbf{X}_{pi} est dans le plan de la roue, \mathbf{Y}_{pi} est perpendiculaire au plan de la roue et \mathbf{Z}_{pi} est normal au plan de la route. Il est utilisé pour déterminer les efforts pneumatiques.

$$\mathbf{R}_{pi} = (\mathbf{O}_{pi}, \mathbf{X}_{pi}, \mathbf{Y}_{pi}, \mathbf{Z}_{pi})$$

Repères centre roue \mathbf{R}_{cr_i} : Il y en a un par roue aussi : $i = 1, \dots, 4$. L'axe \mathbf{X}_{cr_i} est colinéaire à l'axe $\mathbf{X}_{\mathbf{p}_i}$. L'axe \mathbf{Y}_{cr_i} est porté par l'axe de rotation de la roue. L'axe \mathbf{Z}_{cr_i} est dans le plan de la roue. L'origine du repère \mathbf{R}_{cr_i} est \mathbf{O}_{cr_i} , le centre de la roue i .

Le repère lié à la caisse

Ce repère traduit les mouvements de roulis et de tangage et son origine est confondue avec celle du repère \mathbf{R}_v . L'axe \mathbf{X}_c est orienté longitudinalement positivement dans le sens de l'avance, porté par la caisse du véhicule. \mathbf{Y}_c est orienté vers la gauche, porté aussi par la caisse du véhicule et \mathbf{Z}_c est orienté verticalement pour former une base directe.

$$\mathbf{R}_c = (\mathbf{O}_c, \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \mathbf{Z}_c)$$

2.1.2 Relation de changement de repère

Pour décrire la position et l'orientation du véhicule dans chacun des trois repères, nous sommes dans l'obligation de définir des matrices de passage. Ces matrices de passage sont simplement obtenues en écrivant l'expression des vecteurs de la base du repère d'arrivée en fonction des vecteurs de la base du repère de départ.

Passage du repère sol au repère véhicule

Le mouvement de \mathbf{R}_v par rapport à \mathbf{R}_a est constitué par une translation de vecteur directeur O_aO_v et de trois rotations d'axes \mathbf{X}_v , \mathbf{Y}_v et \mathbf{Z}_v et d'angles ϕ_r , θ_r et ψ respectivement, devers, pente et lacet. Pour la simplification des calculs et pour rendre le phénomène plus compréhensible, on introduit deux repères intermédiaires \mathbf{R}'_v et \mathbf{R}''_v ayant la même origine que \mathbf{R}_v (la projection du centre de masse du véhicule sur la route). Les axes de \mathbf{R}'_v , sont liés uniquement au devers de la route. Les axes de \mathbf{R}''_v sont liés au devers et à la pente de la route (θ_r).

Les vecteurs du repère \mathbf{R}'_v s'expriment dans le repère \mathbf{R}_a de la manière suivante :

$$\begin{cases} x'_v &= x_a \\ y'_v &= \cos \phi_r y_a + \sin \phi_r z_a \\ z'_v &= -\sin \phi_r y_a + \cos \phi_r z_a \end{cases}$$

La matrice de passage correspondante est :

$$\mathbf{R}_{\phi_r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_r & \sin \phi_r \\ 0 & -\sin \phi_r & \cos \phi_r \end{bmatrix}$$

Les vecteurs du repère \mathbf{R}''_v s'expriment dans le repère \mathbf{R}'_v de la manière suivante :

$$\begin{cases} x''_v &= \cos \theta_r x'_v + -\sin \theta_r z'_v \\ y''_v &= y'_v \\ z''_v &= \sin \theta_r x'_v + \cos \theta_r z'_v \end{cases}$$

La matrice de passage vaut alors :

$$\mathbf{R}_{\theta_r} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

Les équations de passage du repère \mathbf{R}_v'' au repère \mathbf{R}_v sont :

$$\begin{cases} x_v &= \cos \psi x_v'' + \sin \psi y_v'' \\ y_v &= -\sin \psi x_v'' + \cos \psi y_v'' \\ z_v &= z_v'' \end{cases}$$

La matrice de passage est alors :

$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les figures 2.2 et 2.3 illustrent ces différents repères.

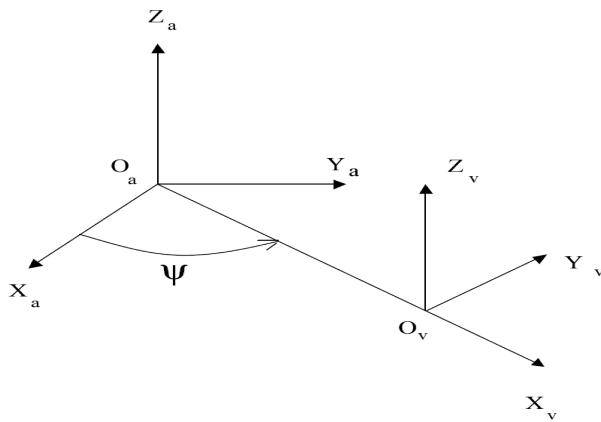


FIG. 2.2 – Repère absolu et repère véhicule : \mathbf{R}_a et \mathbf{R}_v

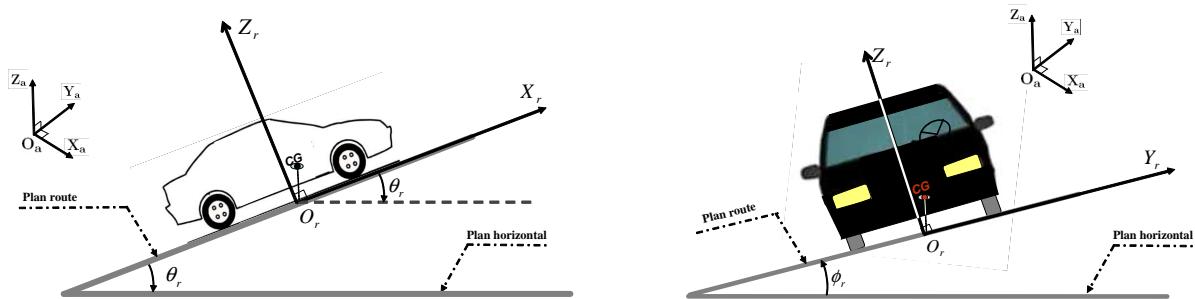


FIG. 2.3 – Repères liés à la pente et au dévers : \mathbf{R}'_v et \mathbf{R}''_v

Alors l'expression des composantes d'un vecteur \vec{X}_v dans \mathbf{R}_v en fonction de ses coordonnées dans \mathbf{R}_a est :

$$\mathbf{X}_v = \mathbf{R}_{\phi_r} \mathbf{R}_{\theta_r} \mathbf{R}_\psi \mathbf{X}_a \quad (2.1)$$

Ainsi, l'expression totale de la matrice de passage du repère \mathbf{R}_a au repère \mathbf{R}_v notée : $\mathbf{R}_1(\mathbf{R}_{\phi_r} \ \mathbf{R}_{\theta_r} \ \mathbf{R}_\psi) = \mathbf{R}_{\phi_r} \mathbf{R}_{\theta_r} \mathbf{R}_\psi$. et :

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi_r \cos \theta_r & \sin \psi \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \cos \psi \sin \theta_r \sin \phi_r - \sin \psi \cos \phi_r & \sin \theta_r \sin \psi \sin \phi_r + \cos \psi \cos \phi_r & \sin \phi_r \cos \theta_r \\ \cos \psi \sin \theta_r \sin \phi_r + \sin \psi \cos \phi_r & \sin \theta_r \sin \psi \sin \phi_r - \cos \psi \sin \phi_r & \cos \phi_r \cos \theta_r \end{bmatrix}_{\mathbf{R}_a \rightarrow \mathbf{R}_v} \quad (2.2)$$

Passage du repère véhicule au repère caisse

La masse suspendue (caisse) subit des mouvements supplémentaires par rapport à la masse non suspendue, à savoir le roulis (ϕ_v), le tangage (θ_v), et le pompage (\bar{Z}). Ces différents mouvements sont rendus possibles grâce à la présence de la suspension sur le véhicule. Notons que le mouvement du repère \mathbf{R}_c par rapport au repère \mathbf{R}_v est constitué par une translation selon l'axe \mathbf{Z}_c et de deux rotations, l'une d'axe \mathbf{X}_c est d'angle ϕ_v , la seconde d'axe \mathbf{Y}_c et d'angle θ_v .

Pour décrire la matrice de passage de \mathbf{R}_v à \mathbf{R}_c , on introduit comme auparavant un repère intermédiaire \mathbf{R}'_c , tel que ce dernier a pour origine la projection de centre de masse du véhicule sur le sol. Ces axes sont liés uniquement au mouvement de roulis de la caisse. Les vecteurs de repère \mathbf{R}'_c s'expriment donc dans le repère \mathbf{R}_v comme suit :

$$\begin{cases} x'_c &= x_v \\ y'_c &= \cos \phi_v y_v + \sin \phi_v z_v \\ z'_c &= -\sin \phi_v y_v + \cos \phi_v z_v \end{cases}$$

La matrice de passage correspondante est :

$$\mathbf{R}_{\phi_v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_v & \sin \phi_v \\ 0 & -\sin \phi_v & \cos \phi_v \end{bmatrix}$$

Les vecteurs de repère \mathbf{R}_c s'expriment dans le repère \mathbf{R}'_c de la manière suivante :

$$\begin{cases} x_c &= \cos \theta_v x'_c + -\sin \theta_v z'_c \\ y_c &= y'_c \\ z_c &= \sin \theta_v x'_c + \cos \theta_v z'_c \end{cases}$$

La matrice de passage vaut alors :

$$\mathbf{R}_{\theta_v} = \begin{bmatrix} \cos \theta_v & 0 & -\sin \theta_v \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_v & 0 & \cos \theta_v \end{bmatrix}$$

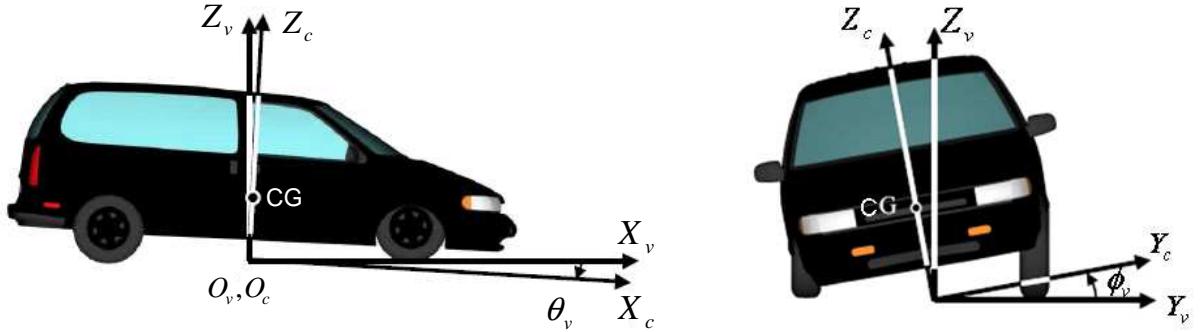
Ainsi, la matrice totale de passage du repère \mathbf{R}_v au \mathbf{R}_c a pour expression :

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_v & \sin \theta_v \sin \phi_v & -\sin \theta_v \cos \phi_v \\ 0 & \cos \phi_v & \sin \phi_v \\ \sin \theta_v & -\cos \theta_v \sin \phi_v & \cos \theta_v \cos \phi_v \end{bmatrix}_{\mathbf{R}_v \rightarrow \mathbf{R}_c}$$

La matrice globale de passage du repère \mathbf{R}_a au \mathbf{R}_c est quant à elle donnée par :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1. \quad (2.3)$$

Nous avons, à présent, tous les outils de passage d'un repère à un autre pour pouvoir écrire l'ensemble des équations du mouvement du véhicule.


 FIG. 2.4 – Repère lié à la caisse : \mathbf{R}_c

2.2 Modélisation du véhicule

Nous nous intéressons dans cette section aux différentes étapes permettant de décrire la dynamique du véhicule (l'évolution de la vitesse et de la vitesse angulaire) sous forme d'équations différentielles linéaires ou non-linéaires. Pour obtenir ces équations, nous allons appliquer les principes fondamentaux de la mécanique des corps solides (Principes de Newton). Le premier principe concerne l'équilibre des forces extérieures agissant sur le véhicule et le deuxième, l'équilibre des moments dynamiques du véhicule par rapport aux moments extérieurs.

2.2.1 Principes fondamentaux de la dynamique

Dans cette partie, nous allons développer les principes qui nous permettent de décrire la dynamique du véhicule dans le repère \mathbf{R}_v .

Le premier principe

Ce principe est aussi connu sous le nom du **premier principe du Newton** [Gla04, Nou02] ou encore équation des forces. Il traduit le fait que la somme des forces extérieures appliquées au véhicule ($\sum \vec{F}_{est}$) est égale à sa masse m , supposée constante, multipliée par son accélération ($\vec{\Gamma}$) :

$$m \vec{\Gamma} = \sum \vec{F}_{est} \quad (2.4)$$

Le deuxième principe (Équations des moments)

La somme des moments extérieurs, appliqués en un point O d'un corps solide en mouvement est égale au moment dynamique (\vec{H}_O) de ce corps exprimé au point O [Gla04, Nou02, Sen07b] :

$$\sum \vec{M}_{est_O} = \vec{H}_O \quad (2.5)$$

où \vec{F}_{est} et \vec{M}_{est_O} sont respectivement les forces extérieures et les moments extérieurs qui s'appliquent sur le véhicule. Le véhicule a une masse totale m , $\vec{\Gamma}$ est le vecteur accélération du véhicule et \vec{H}_O est le moment dynamique appliqué au point O du véhicule.

Nous cherchons, dans la suite, à exprimer chacune des composantes de $\vec{\Gamma}$ et \vec{H}_O

2.2.2 Calcul du moment dynamique H_O

La formulation du moment dynamique H_O provient de l'application du Théorème de Koenig [Li07, Gla04]. Il est important de noter, à ce stade, que l'application de ce théorème n'est possible que si les moments d'inertie de la masse suspendue du véhicule sont constants. Cette condition est en pratique vraie dans le repère \mathbf{R}_c . Nous calculons donc le moment dynamique dans ce repère et il sera noté H_{O_c} . D'après le théorème de Koenig, le moment dynamique du véhicule en \mathbf{O}_c peut s'effectuer en G (centre de masse du véhicule), en appliquant la relation suivante :

$$H_{O_c} = H_G + r_G^c \wedge m_s \gamma_{O_c}^c \quad (2.6)$$

où m_s représente la masse suspendue du véhicule. $\gamma_{O_c}^c$ représente l'accélération absolue du véhicule au point G dans le repère \mathbf{R}_c et H_G est le moment dynamique du véhicule au centre de masse G dans le même repère. Le moment dynamique en G se calcule simplement en dérivant le moment cinétique (H_{cin}) en ce point. Le moment cinétique s'écrit comme le produit de la matrice d'inertie du mobile considéré, I , et du vecteur vitesse de rotation, Ω :

$$H_{cin} = I \dot{\Omega} \quad \Leftrightarrow H_G = I \ddot{\Omega} + \Omega \wedge I \Omega \quad (2.7)$$

(\cdot) est la opérateur de dérivation effectuée dans le repère absolu, (\circ) est la l'opérateur de dérivation effectuée dans le repère lié au mobile considéré. Ces deux dérivations sont liées par la relation $\dot{X} = \ddot{X} + \Omega \wedge X$. Ω est le vecteur de vitesse de rotation entre le repère absolu et le repère lié à la caisse. Nous avons $\dot{\Omega} = \ddot{\Omega}$, sachant que \wedge est le produit vectoriel.

La matrice d'inertie a pour expression dans le repère lié à ce mobile :

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.2.3 Expression de l'accélération

Soit X_G^c la projection dans le repère lié à la caisse de la position du centre de gravité dans le repère absolu (\mathbf{O}_c , origine du repère \mathbf{R}_c). Ce vecteur s'exprime alors sous la forme suivante [Nou02] :

$$X_G^c = X_{o^c}^c + r_G^c \quad (2.9)$$

avec $r_G^c = \overline{O_c G}$.

Pour obtenir la vitesse de G , il suffit de dériver l'équation (2.9) dans le repère absolu :

$$\begin{aligned} V_G^c &= \dot{X}_G^c \\ \Leftrightarrow V_G^c &= \dot{X}_{o^c}^c + \dot{r}_G^c \\ \Leftrightarrow V_G^c &= \dot{V}_{o^c}^c + r_{o^c}^c + \Omega \wedge r_G^c \end{aligned} \quad (2.10)$$

En dérivant une dernière fois cette expression, nous obtenons l'accélération de G :

$$\begin{aligned}
 \Gamma_G^c &= \ddot{X}_G^c = \dot{V}_G^c \\
 \Leftrightarrow \Gamma_G^c &= \dot{V}_{o^c}^c + \overset{\circ}{r}_G^c + \dot{\Omega} \wedge r_G^c + \Omega \wedge \dot{r}_G^c \\
 \Leftrightarrow \Gamma_G^c &= \Gamma_{o^c}^c + \overset{\circ}{r}_G^c + \Omega \wedge \overset{\circ}{r}_G^c + \overset{\circ}{\Omega} \wedge r_G^c + \Omega \wedge \overset{\circ}{r}_G^c + \Omega \wedge (\Omega \wedge r_G^c) \\
 \Leftrightarrow \Gamma_G^c &= \Gamma_{o^c}^c + \overset{\circ}{r}_G^c + 2\Omega \wedge \overset{\circ}{r}_G^c + \overset{\circ}{\Omega} \wedge r_G^c + \Omega \wedge (\Omega \wedge r_G^c)
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Dans cette expression de l'accélération, nous retrouvons les composantes traditionnelles de l'accélération relative avec le terme $\overset{\circ}{r}_G^c$, de l'accélération d'entraînement, noté $\Gamma_{o^c}^c = \overset{\circ}{\Omega} \wedge r_G^c + \Omega \wedge (\Omega \wedge r_G^c)$ et de l'accélération de coriolis ($2\Omega \wedge \overset{\circ}{r}_G^c$). L'expression de l'accélération de \mathbf{O}_c est équivalente à $\Gamma_{o^c}^c = \overset{\circ}{V}_{o^c}^c + \Omega \wedge V_{o^c}^c$.

2.2.4 Modèle de braquage

L'angle de rotation du volant (δ_v) d'une voiture étant proportionnel à l'angle de braquage des roues δ , ce dernier est commandé soit par le conducteur, soit par un système de direction active [Hie04]. À partir de la mesure de l'angle au volant et du rapport de transmission i_v liant l'angle de braquage à cet angle, on peut déduire l'angle de braquage des pneumatiques.

$$\delta = \delta_v / i_v \tag{2.12}$$

Dans certains véhicules modernes, ce rapport n'est plus constant. L'introduction du système de direction active permet d'adapter ce rapport de transmission à la situation de conduite courante (la vitesse du véhicule par exemple) [Hie04]. Dans ce cas, l'équation (2.12) ne peut plus être appliquée, puisque i_v varie en fonction des paramètres de conduite, donc en fonction du temps.

2.2.5 Forces extérieures agissant sur le véhicule

Durant son mouvement, le véhicule est soumis à des forces et des moments d'origines diverses qui agissent sur tout ou partie de sa structure. Le mouvement du véhicule est principalement déterminé par les forces d'interaction entre les pneumatiques et la chaussée [Mam02]. Ces interactions peuvent être décomposées sous la forme de forces latérales de guidage, de forces longitudinales de freinage ou d'accélération ainsi qu'un couple d'auto-alignement. Le véhicule est par ailleurs soumis à des forces d'origine gravitationnelle ou aérodynamique (forces normales, forces de roulement, portance, poussées latérales, ...). On présente ci-dessous plus de détails sur l'origine et les formules mathématiques de ces forces.

Forces de résistance au roulement

Le déplacement du véhicule est freiné par des forces de frottement dues à son propre poids [Raj06, Sté04a]. Les forces de résistance au roulement F_{r_i} ($i = 1, \dots, 4$) agissent dans le sens opposé au déplacement. Elles dépendent de la valeur des forces de réaction des roues et s'expriment comme suit :

$$F_{r_i} = k_{rou} F_{n_i}$$

F_{n_i} avec $i = 1, \dots, 4$ représente la somme des réactions verticales relatives aux roues i et k_{rou} est le coefficient de résistance au roulement constant, influencé par l'état et la géométrie de la route, l'état du pneumatique ainsi que sa vitesse.

Forces aérodynamiques

La force aérodynamique résulte du déplacement du véhicule dans l'air immobile ou en mouvement. Elle est opposée au sens du déplacement relatif du véhicule par rapport à l'air. Le point d'application de cette force est généralement différent du centre de masse G du véhicule puisqu'il se situe en général sur la carrosserie [Raj06]. Son torseur d'efforts est composé de deux forces : traînée ($F_{x\text{aéro}}$) et dérive ($F_{y\text{aéro}}$). Ces forces sont dirigées respectivement le long de l'axe longitudinal et latéral du repère lié au véhicule. Son expression [Ven03] est la suivante :

$$F_{\text{aéro}} = \begin{cases} F_{x\text{aéro}} &= -\frac{1}{2}\rho_{\text{air}}C_{x\text{air}}S_fV_{x\text{air}}^2 \\ F_{y\text{aéro}} &= -\frac{1}{2}\rho_{\text{air}}C_{y\text{air}}S_tV_{y\text{air}}^2 \end{cases} \quad (2.13)$$

où ρ_{air} est la masse volumique de l'air supposée constante et égale à 1.225 kg/m^3 , S_f/S_t sont respectivement la surface frontale et transversale du véhicule et $C_{x\text{air}}/C_{y\text{air}}$ sont respectivement le coefficient de pénétration dans l'air en longitudinal et en transversal. Le vecteur vitesse aérodynamique ($\overrightarrow{V}_{\text{air}}$) s'exprime :

$$\overrightarrow{V}_{\text{air}} = \overrightarrow{V} - \overrightarrow{V}_{\text{air/sol}} \quad (2.14)$$

$V_{\text{air/sol}}$ est la vitesse du vent par rapport au sol. La norme $\|V_{\text{air}}\|$ est souvent considérée comme égale à la vitesse longitudinale V_x du véhicule. Cela revient à supposer que les autres composantes du vecteur vitesse du véhicule sont négligeables devant la vitesse longitudinale, et que la vitesse du vent est également très faible devant celle-ci.

Forces verticales

L'action de la masse de l'automobile et les effets de transfert de charge dus aux inerties entraînent des réactions différentes sur chacune des roues. Ces réactions permettent d'évaluer la force de résistance au roulement ainsi que la force développée par chaque roue. Les forces normales (F_{ni}) agissant sur chaque roue sont définies en fonction de la masse totale du véhicule et de ses paramètres géométriques, de l'accélération longitudinale a_x , de l'accélération latérale a_y , de la pente et du dévers de la route [Mam02, Sen06]. Les équations mathématiques de ces forces sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} F_{n1} & = & \frac{l_r mg \cos \phi_r \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} - \frac{h_g m \gamma_x}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_r h_g m \gamma_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n2} & = & \frac{l_r mg \cos \phi_r \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} - \frac{h_g m \gamma_x}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_r h_g m \gamma_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n3} & = & \frac{l_f mg \cos \phi_r \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} + \frac{h_g m \gamma_x}{2(l_r + l_f)} - \frac{l_f h_g m \gamma_y}{S_b(l_r + l_f)} \\ F_{n4} & = & \frac{l_f mg \cos \phi_r \cos \theta_r}{2(l_r + l_f)} + \frac{h_g m \gamma_x}{2(l_r + l_f)} + \frac{l_f h_g m \gamma_y}{S_b(l_r + l_f)} \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Remarque : Le transfert de charge de l'avant à l'arrière est dû aux accélérations et freinages du véhicule, aux forces longitudinales du vent, à la pente de la route.... Le transfert de charge de la droite à la gauche est dû aux forces centrifuges ressenties par le véhicule dans les virages, aux forces latérales du vent, au dévers de la route....

Forces de contact pneumatique chaussée

Les forces de contact pneumatique chaussée [Raj06, Mam02, Gla04, Sté04a] influencent fortement la dynamique du véhicule. Cette partie se concentre sur les modèles mathématiques les plus répandus dans la littérature pour décrire ces forces.

Contrairement à l'hypothèse du pneu rigide, où on suppose que le point de contact est réduit à un point, le pneu d'un véhicule se déforme en fonction de la charge verticale qu'il subit, et forme une zone de contact avec la chaussée qui n'est pas réduite à un point.

Modèles paramétriques de type “formule magique” : La plus connue et certainement la plus utilisée des modélisations des efforts de contact entre le pneumatique et la chaussée est celle définie par B. Pacejka qu'on appelle couramment la “formule magique”

Le modèle proposé par Pacejka à la fin des années 1970 [Pac79] est issu d'une identification des paramètres d'une courbe à partir de données expérimentales. Il ne correspond pas vraiment à une représentation physique des phénomènes, mais on y retrouve beaucoup de réalisme.

Cette formule est dite magique pour différentes raisons. En effet, elle offre, à partir d'une représentation simple, une bonne adéquation avec les données expérimentales. Elle permet aussi d'exprimer, simplement par le jeu des paramètres, les efforts longitudinaux, transversaux ainsi que le moment d'auto-alignement [Sté04a]. Enfin, les paramètres sont ajustables pour représenter au mieux la configuration de la roue (carrossage, charge variable, couplage longitudinal et transversal, etc.).

Modèle de Pajecka [Pac91] : Le modèle original se présente, en posant x_p l'entrée du modèle et y_p la sortie, comme :

$$y_p(x_p) = D_p \sin[C_p \arctan(B_p x_p - E_p(B_p x_p - \arctan(B_p x_p)))] \quad (2.16)$$

Cette formule permet de produire une courbe qui passe par l'origine. Dans certains cas de figure, il peut être intéressant de produire une courbe décalée. Il faut alors prévoir l'ajout de décalages ou offsets. Une translation horizontale de la courbe par S_h et un décalage vertical par S_v , peuvent alors être ajoutés (voir la Fig 2.5).

$$\begin{aligned} Y_p(X_p) &= y_p(x_p) + S_v \\ x_p &= X_p + S_h \end{aligned} \quad (2.17)$$

Les sorties $y_p(x_p)$ du modèle peuvent être :

- F_{x_i} : force longitudinale.
- F_{y_i} : force transversale.
- $M_{z_{p_i}}$: moment d'auto-alignement du pneu i .

Pour les entrées respectives :

λ_i : glissement longitudinal.

α_i : dérive du pneumatique.

Le décalage horizontal S_{hx} pour la force longitudinale est fonction de la force de résistance au roulement F_{r_i} . L'angle de carrossage γ_{c_i} joue quant à lui un rôle dans le décalage de la courbe de la force transversale F_{y_i} sur les offsets S_{h_y} et S_{v_y} .

Les différents paramètres de cette formule magique ont les attributs suivants :

D_p : valeur maximale de la courbe.

C_p : facteur de forme (elle fixe le type de courbe).

B_p : coefficient de raideur (contrôle la pente à l'origine).

E_p : courbure (agit en courbant localement la fonction. Il contrôle l'abscisse de glissement à laquelle la valeur maximale est atteinte).

S_v : décalage à l'origine, en vertical.

S_h : décalage à l'origine, en horizontal.

$\arctan(B_p C_p D_p)$: pente à l'origine de la courbe. c'est-à-dire au point d'inflexion. Pour les efforts transversaux, cela correspond à la rigidité de dérive.

$D_p \sin(\frac{\pi}{2} C_p)$: la valeur limite de la force, C_p permet de diminuer l'efficacité du pneumatique lorsqu'il est trop fortement sollicité.

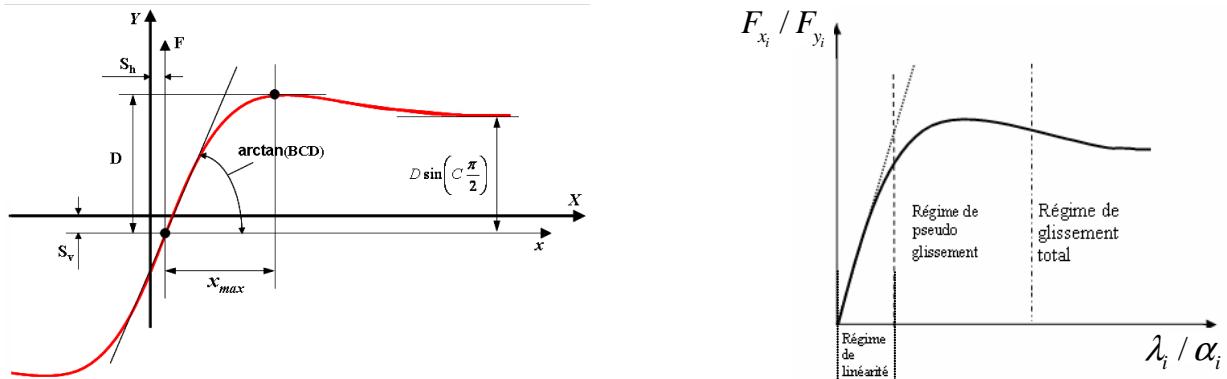


FIG. 2.5 – Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka

Remarques : À partir de la Fig. 2.5, il est clair que si le glissement longitudinal et l'angle de dérive sont petits, alors les forces de contact pneumatique chaussée respectivement longitudinales/latérales sont proportionnelles aux glissements/angle de dérive.

Les variations de la force latérale selon Pacejka en fonction de la force normale F_n appliquée sur le pneumatique ainsi que les paramètres B_p , C_p , D_p et E_p , sont représentées respectivement, sur les figures Fig. 2.6 et Fig. 2.7.

Une fois appliqués aux efforts longitudinaux transversaux, les efforts longitudinaux sont donnés par :

$$F_{x_i}(\lambda_i + S_{h_{x_i}}) = D_{x_i} \sin[C_{x_i} \arctan(B_{x_i}(\lambda_i + S_{h_{x_i}}) - E_{x_i}(\lambda_i + S_{h_{x_i}}) - \arctan(B_{x_i}(\lambda_i + S_{h_{x_i}})))] + S_{v_{x_i}} \quad (2.18)$$

où λ_i est le glissement longitudinal, les efforts transversaux par :

$$F_{y_i}(\alpha_i + S_{h_{y_i}}) = D_{y_i} \sin[C_{y_i} \arctan(B_{y_i}(\alpha_i + S_{h_{y_i}}) - E_{y_i}(\alpha_i + S_{h_{y_i}}) - \arctan(B_{y_i}(\alpha_i + S_{h_{y_i}})))] + S_{v_{y_i}} \quad (2.19)$$

et pour les moments d'auto-alignement par :

$$M_{z_i}(\alpha_i + S_{h_{z_i}}) = D_{z_i} \sin[C_{z_i} \arctan(B_{z_i}(\alpha_i + S_{h_{z_i}}) - E_{z_i}(\alpha_i + S_{h_{z_i}}) - \arctan(B_{z_i}(\alpha_i + S_{h_{z_i}})))] + S_{v_{z_i}} \quad (2.20)$$

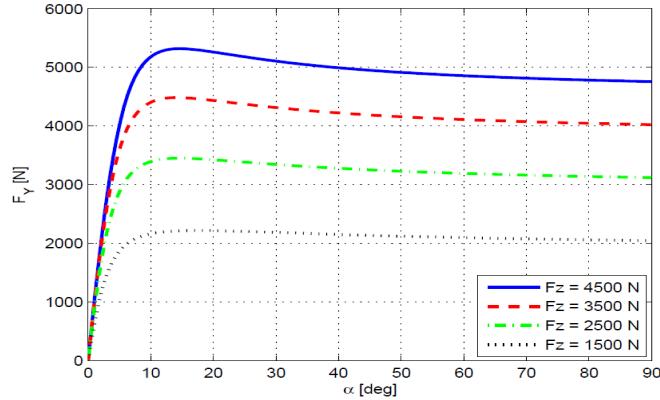


FIG. 2.6 – Variation des forces latérales en fonction de la dérive du pneumatique et des forces normales selon Pacejka .

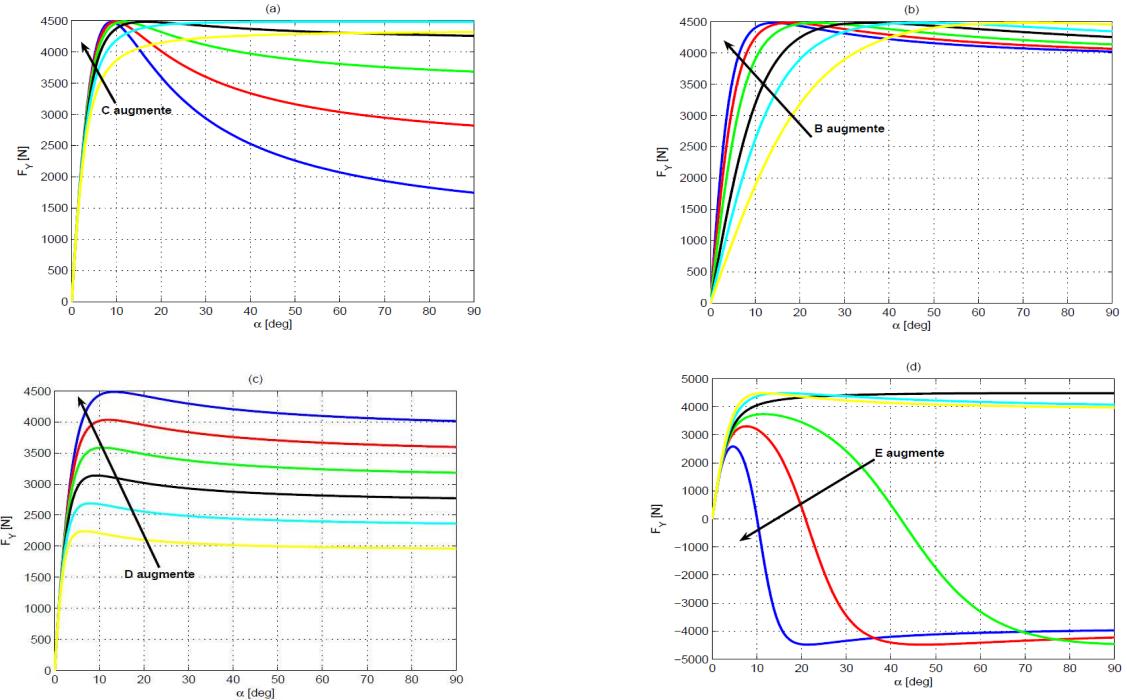


FIG. 2.7 – Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka pour des variations de C_p , B_p , D_p et E_p .

où α_i est la dérive latérale du pneumatique i .

On retrouve dans l'analyse de ces courbes les phénomènes décrits par les modèles physiques. En effet, en regardant l'allure de la courbe des efforts transversaux sur la Fig. 2.8 (courbe à droite), on retrouve bien la zone de comportement linéaire où la force est proportionnelle à la dérive, la zone de transition où l'effort continue d'augmenter, mais dans une proportion moindre à cause du glissement qui s'établit et enfin la zone où le pneumatique entre dans une zone de glissement total.

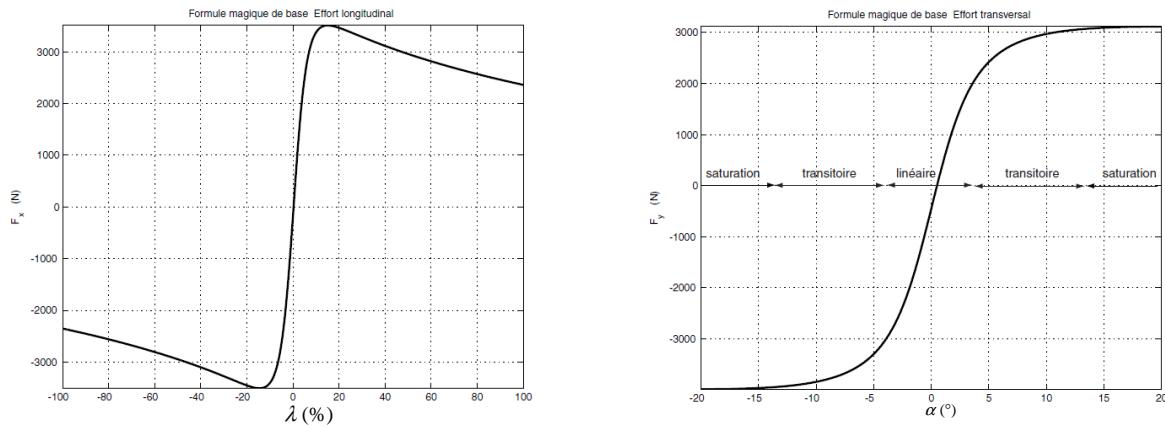


FIG. 2.8 – Efforts longitudinaux et transversaux des pneumatiques suivant le modèle initial de Pacejka

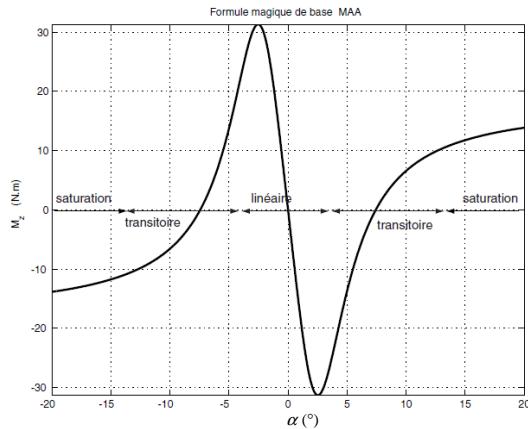


FIG. 2.9 – Efforts d'auto-alignement des pneumatiques suivant le modèle initial de Pacejka

On retrouve dans l'analyse de la courbe du moment d'auto-alignement (Fig. 2.9), les trois zones décrites ci-avant pour les efforts transversaux. L'analyse de cette courbe n'est pas négligeable pour la compréhension du comportement du pneumatique. En effet, si on ne regarde que la partie de la courbe où la dérive est positive, on peut noter que la croissance du moment d'auto-alignement indique l'utilisation de la zone de transition et qu'au changement de signe, le pneumatique est effectivement en glissement. Aux fortes dérives, le moment d'auto-alignement doit tendre vers zéro. On remarque sur la courbe correspondante que ce n'est pas le cas. Ceci est un défaut connu du modèle présenté par différents auteurs dont [Det97, Lec01].

Pour les efforts longitudinaux, l'allure de la courbe (courbe à gauche sur la Fig. 2.8) est assez comparable à celle des efforts transversaux, à ceci près que la décroissance des efforts lors de forts glissements est ici prise en compte.

Remarque : En comparant le moment d'auto-alignement avec les forces latérales, nous pouvons constater que le maximum du moment d'auto-alignement se situe avant le maximum de

force latérale et la zone de forte diminution de ce moment correspond à la zone où la force est maximale. En fait, ce principe est utilisé par les pilotes de course [Gla04] pour détecter les limites de contrôlabilité de leur véhicule : dès qu'ils ressentent une diminution de la force nécessaire pour faire tourner ou maintenir le volant, ils savent qu'ils approchent du maximum de force latérale

Prise en compte de la charge et du carrossage : La forme de base de la formule magique néglige les effets de nombreux paramètres comme le coefficient de rigidité de dérive ou le carrossage en les considérant comme constants. C'est pourquoi [Raj06] modifient les paramètres en introduisant les influences de la charge et du carrossage dans la modélisation.

Pour les efforts longitudinaux, l'influence de la charge supportée par la roue F_{n_i} sur les paramètres est représentée par :

$$\begin{aligned} D_{x_i} &= F_{n_i}(b_1 F_{n_i} + b_2) \\ B_{x_i} &= \frac{1}{C_{x_i} D_{x_i}}(b_3 - F_{n_i} + b_4)F_{n_i} \exp(-b_5 F_{n_i}) \\ C_{x_i} &= C_1^{st} \\ E_{x_i} &= (b_6 F_{n_i}^2 + b_7 F_{n_i} + b_8)(1 - b_9 \operatorname{sgn}(\lambda_i + S_{h_{x_i}})) \\ S_{h_{x_i}} &= b_{10} F_{n_i} + b_{11} \\ S_{v_{x_i}} &= b_{12} F_{n_i} + b_{13} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Les différents coefficients b_j $j = 1, 2, \dots, 13$ sont fixés pour des conditions expérimentales données (type de pneumatique, pression de gonflage, condition d'adhérence, vitesse \dots). Ainsi, pour chaque type de revêtement, il faut identifier ces différents paramètres.

Pour les efforts transversaux, on peut détailler les expressions des paramètres en fonction de la charge supportée par la roue F_{n_i} et de l'angle de carrossage γ_c [Pac91] :

$$\begin{aligned} D_{y_i} &= F_{n_i}(a_1 F_{n_i} + a_2)(1 - a_3 \gamma_{c_i}) \\ B_{y_i} &= \frac{1}{C_{y_i} D_{y_i}} a_4 \sin(2 \arctan(\frac{F_{n_i}}{a_5}))(1 - a_6 |\gamma_{c_i}|) \\ C_{y_i} &= C_2^{st} \\ E_{y_i} &= (a_7 F_{n_i} + a_8)(1 - (a_9 \gamma_{c_i} + a_{10} \operatorname{sgn}(\alpha_i + S_{h_{y_i}}))) \\ S_{h_{y_i}} &= a_{11} F_{n_i} + a_{12} + a_{13} \gamma_{c_i} \\ S_{v_{y_i}} &= b_{14} F_{n_i} + b_{15} + \gamma_{c_i} (a_{16} F_{n_i}^2 + a_{17} F_{n_i}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Les différents coefficients $a_j = 1, 2, \dots, 17$ sont fixés pour des conditions expérimentales données. Pour le moment d'auto-alignement, on peut détailler les expressions des paramètres en fonction de l'angle de carrossage et de la charge par [Pac87] :

$$\begin{aligned} D_{z_i} &= F_{n_i}(c_1 F_{n_i} + c_2) \\ B_{z_i} &= \frac{1}{C_{z_i} D_{z_i}} c_3 |\gamma_{c_i}| (\frac{c_4 F_{n_i}^2 + c_5 F_{n_i}}{\exp(c_6 F_{n_i})}) \\ C_{z_i} &= C_3^{st} \\ E_{z_i} &= c_3 |\gamma_{c_i}| (c_7 F_{n_i}^2 + c_8 F_{n_i} + c_9) \\ S_{h_{z_i}} &= c_{10} |\gamma_{c_i}| \\ S_{v_{z_i}} &= c_{11} F_{n_i}^2 + c_{12} F_{n_i}) |\gamma_{c_i}| \end{aligned} \quad (2.23)$$

Les différents coefficients c_j $j = 1, 2, \dots, 12$ sont fixés pour des conditions expérimentales données.

Couplage du modes longitudinal et transversal : Jusqu'à présent, les efforts issus des modes longitudinaux et latéraux ne sont pas dépendants les uns des autres. Cette description des efforts n'est donc pas réaliste lorsque nous stimulons fortement le pneumatique en longitudinal et en latéral. En effet, la somme des efforts peut dépasser fortement le maximum possible.

Effort longitudinal couplé : On tient maintenant compte de l'influence des efforts latéraux et de la dérive, on obtient :

$$\begin{aligned} C_{C_1} &= P_{xy}^1 \\ A_{C_1} &= P_{xy}^2 \\ B_{C_1} &= P_{xy}^3 \cos(\arctan(\lambda P_{xy}^4)) \\ G_{p_{x_i}} &= \frac{\cos(C_{C_1} \arctan(B_{C_1}(\alpha_i - A_{ELC})))}{\cos(C_{C_1} \arctan(-B_{C_1} \cdot A_{C_1}))} \\ F_{x_i} &= F_{x0_i} G_{p_{x_i}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

P_{xy}^j $j = 1, \dots, 4$ sont des paramètres longitudinaux supplémentaires. F_{x0_i} est l'effort longitudinal "pur".

Effort latéral couplé : L'effort latéral "pur" F_{x0_i} est modifié par les efforts longitudinaux de la façon suivante :

$$\begin{aligned} F_{yx\alpha_i} &= \cos(\arctan(P_{yx}^1 \alpha_i)) \\ F_{yx\lambda_i} &= \sin(C_3^{st} \arctan(P_{yx}^2 \lambda_i)) \\ F_{yx_i} &= P_{yx}^3 F_{n_i} (\gamma_{c_i} P_{yxy}^4 F_{n_i} - P_{yx}^5) F_{yx\alpha_i} F_{yx\lambda_i} \\ A_{C_2} &= P_{yx}^6 \\ B_{C_2} &= P_{yx}^7 \cos(\arctan(P_{yx}^7 (\alpha - P_{xy}^8))) \\ C_{C_2} &= P_{yx}^9 \\ G_{p_{y_i}} &= \frac{\cos(C_{C_2} \arctan(B_{C_2}(\lambda_i - A_{C_2})))}{\cos(C_{C_2} \arctan(-B_{C_2} \cdot A_{C_2}))} \\ F_{y_i} &= F_{y0_i} G_{p_{y_i}} + F_{yx_i} \end{aligned} \quad (2.25)$$

P_{xy}^j $j = 1, \dots, 9$ sont des paramètres latéraux du modèle mixte. F_{y0_i} est l'effort latéral pur.

Modèle des forces de Dugoff : C'est un modèle empirique donnant une relation analytique de la force latérale et longitudinale en fonction de l'angle de glissement (α_i), du taux de glissement (λ_i), de la force normale (F_{n_i}) et les raideurs du pneumatique (C_{x_i} et C_{y_i}). Il introduit le couplage entre les efforts et permet ainsi la représentation de l'ellipse de friction [Raj06, Dug69, Dug70]. Il suppose une distribution uniforme de la pression verticale sur la zone du contact du pneu. Il s'agit d'une simplification par rapport à la pression parabolique pris dans [Pac79, Pac87]. Cette dernière est plus réaliste au sens de la répartition de la pression. L'expression des forces longitudinales et latérales d'après Dugoff est :

$$\begin{cases} F_{xi} = C_{xi} \frac{\lambda_i}{1-\lambda_i} k_i \\ F_{yi} = C_{yi} \frac{\tan \alpha_i}{1-\lambda_i} k_i \end{cases} \quad (2.26)$$

avec

$$k_i = \begin{cases} (2 - \sigma_i) \sigma_i & \text{si } \sigma_i < 1 \\ 1 & \text{si } \sigma_i \geq 1 \end{cases} \quad (2.27)$$

et

$$\sigma_i = \frac{(1 - \lambda_i) \mu_i F_{n_i}}{2 \sqrt{C_{xi}^2 \lambda_i^2 + C_{yi}^2 \tan^2 \alpha_i}} \quad (2.28)$$

C_{xi} et C_{yi} sont respectivement les raideurs longitudinale et latérale de chaque pneu. μ_i est le coefficient d'adhérence pneumatique chaussée.

Remarques : On caractérise généralement l'adhérence du contact pneumatique chaussée par une variable $\mu \in]0, 1]$. La signification physique de μ dépend de sa valeur dans l'intervalle considéré. Lorsque $\mu \rightarrow 1$, l'adhérence est maximale et le contact pneumatique chaussée est alors considéré comme excellent. A l'opposé, lorsque $\mu \rightarrow 0$, la chaussée est supposée verglacée, ce qui se traduit par une adhérence quasi-nulle. Les coefficients intermédiaires correspondent à des chaussées humides ($\mu = 0,6$) et des chaussées très glissantes ($\mu = 0,3$). Elles font la transition entre les types de chaussées.

Pour des valeurs faibles de λ_i et de α_i , le paramètre k_i est grand et donc k_i est limité à 1. Dans ce cas là, le couplage n'a pas ou a peu d'effet [Gla04].

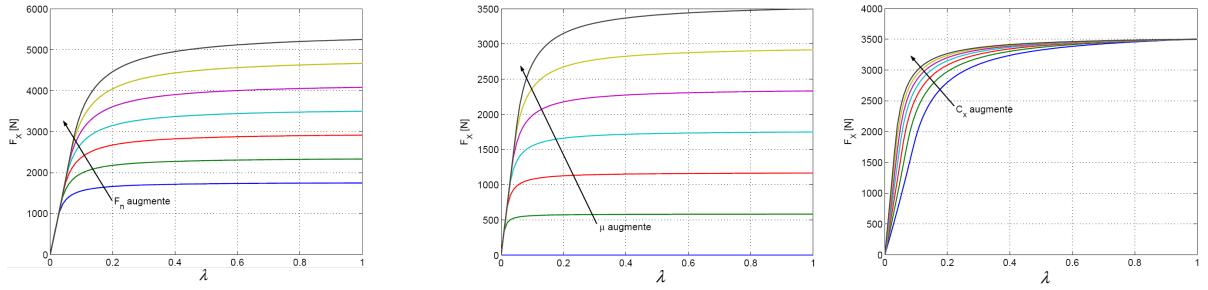


FIG. 2.10 – Variation des efforts de glissement pur en fonction de la force normale, de l'adhérence et de la raideur du pneumatique

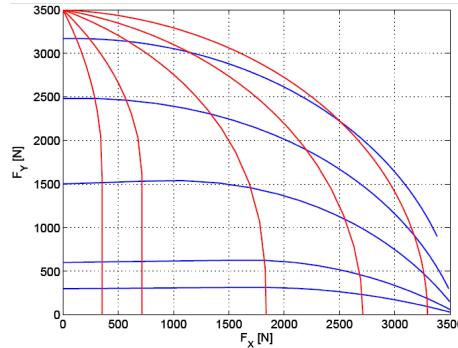


FIG. 2.11 – Représentation de l'ellipse de friction de Dugoff

Comparaison des efforts de glissement pur

À partir des paramètres déterminés dans la partie précédente, les forces générées par les modèles de Dugoff et de Pacejka ont été comparées. La figure 2.12 montre les résultats de cette comparaison pour les modes longitudinal et latéral pour différentes valeurs de l'adhérence μ .

Remarques : Le modèle de Dugoff à l'avantage d'être un modèle analytique développé à partir du calcul des bilans des frottements entre le pneu et la chaussée [Dug69, Dug70]. Il représente les efforts d'une manière assez fiable dans la zone de linéarité et de pseudo-glissement.

Les modèles de type Dugoff ou Pacejka offrent un bon compromis entre réalisme et temps de calcul, avec un avantage certain pour le modèle de Dugoff du fait du nombre restreint de coefficients à identifier. C'est celui-là qui sera utilisé dans la suite de la thèse.

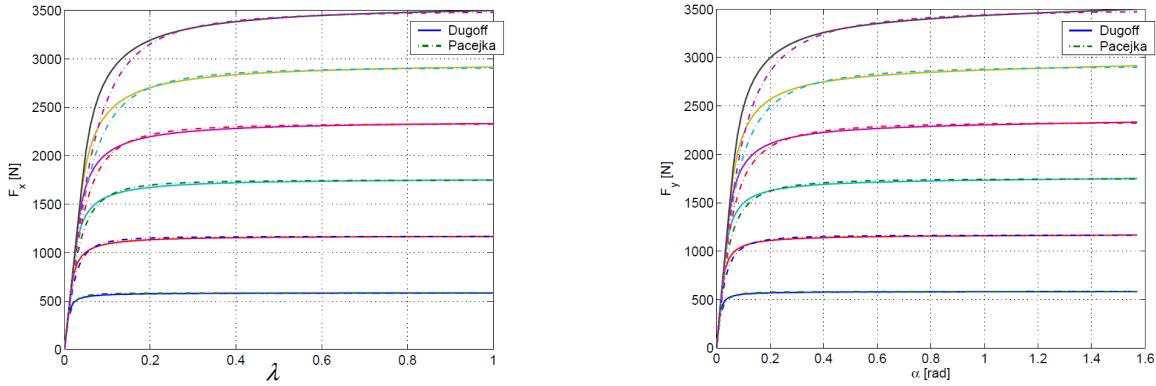


FIG. 2.12 – Efforts longitudinaux et latéraux de Dugoff (trait plein) et Pacejka (pointillé)

2.2.6 Les glissements longitudinaux et transversaux

Glissements longitudinaux

Le glissement longitudinal est la variable clef pour le calcul des efforts longitudinaux. Le calcul de ce glissement peut se faire à différents niveaux de complexité. En effet, on peut faire l'approximation que les efforts sont caractérisés au niveau de la projection verticale du centre de la roue ou considérer que les efforts s'appliquent au niveau du point de détachement de l'aire de contact, ce qui déplace le lieu de calcul de la vitesse. Généralement, le glissement longitudinal est considéré comme la vitesse de glissement normalisée entre la vitesse équivalente de rotation de la roue $\omega_i R_{e_i}$ et la vitesse du point de contact appartenant au sol V_{A_i} , $i = 1, \dots, 4$. Pour la roue i le taux de glissement longitudinal est défini par :

$$\begin{cases} \lambda_i &= \frac{\omega_i R_{e_i}}{V_{A_i}} - 1 && \text{(freinage)} \\ \lambda_i &= 1 - \frac{V_{A_i}}{\omega_i R_{e_i}} && \text{(accélération)} \end{cases} \quad (2.29)$$

Si on suppose que le point de contact du pneumatique i avec la chaussée est simplement la projection verticale du centre de même pneu, alors le glissement longitudinal s'écrit [Mam02] :

$$\begin{cases} \lambda_i &= \frac{\omega_i R_{e_i}}{V_{x_i}} - 1 && \text{(freinage)} \\ \lambda_i &= 1 - \frac{V_{x_i}}{\omega_i R_{e_i}} && \text{(accélération)} \end{cases} \quad (2.30)$$

avec V_{x_i} est la vitesse longitudinale de pneu i . On voit bien, à travers ces expressions, que le rayon effectif de la roue R_{e_i} joue un rôle prépondérant dans le calcul de la variable de glissement.

Rayons statique et dynamique de la roue : On note R_{0_i} le rayon nominal qui correspond à la donnée constructeur d'un pneumatique qui n'est soumis à aucune contrainte.

Lorsque le pneumatique est soumis à une charge verticale F_{n_i} , sa flexibilité verticale statique provoque un écrasement du pneumatique, le rayon devient alors R_{stat} , appelé rayon statique ou rayon sous charge.

En roulement, le rayon du pneumatique change (pour une raison de simplification on suppose que le pneu garde un aspect circulaire), dans ce cas, on obtient un rayon R_e appelé **rayon dynamique** ou effectif.

Interprétation géométrique : On utilise une méthode fondée sur le modèle de déformation du pneumatique appelé variante du modèle par contact ponctuel. Cette variante ne fait intervenir que le ressort [Sté04a]. C'est celui utilisé pour calculer le rayon effectif de la roue et pour simuler le comportement vibratoire vertical du véhicule. La Fig 2.13 donne une représentation schématique de ce modèle.

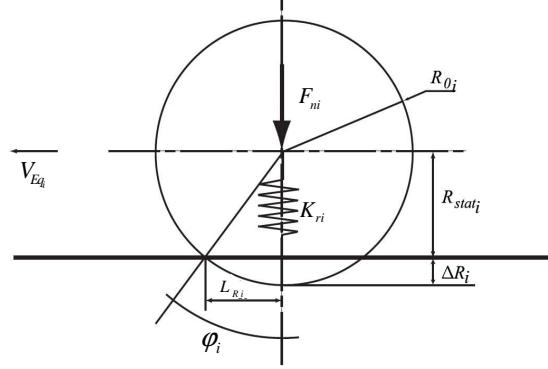


FIG. 2.13 – Schématisation du rayon de la roue

Du fait de l'utilisation de ce modèle de pneumatique, qui assimile la déformation verticale à celle d'un ressort on peut, à l'aide de la raideur du pneu K_{r_i} , calculer en fonction de la charge F_{n_i} l'écrasement du pneumatique. Celui-ci sera alors égal à :

$$\Delta R_i = \frac{F_{n_i}}{K_{r_i}} \quad (2.31)$$

le rayon statique de la roue est donné par :

$$R_{stat_i} = R_{0_i} - \Delta R_i \quad (2.32)$$

Pour calculer le rayon dynamique de la roue, il faut tout d'abord définir la vitesse équivalente de celle-ci. Cette vitesse est notée V_{Eq_i} tel que :

$$V_{Eq_i} = \omega_i R_{e_i} \quad (2.33)$$

où ω_i correspond à la vitesse angulaire de la roue.

La vitesse équivalente de la roue ainsi que la vitesse angulaire peuvent aussi être calculées en utilisant le calcul des déplacements élémentaires pendant une durée δt .

$$V_{Eq_i} = \frac{L_{R_i}}{\delta t} \quad (2.34)$$

$$\omega_i = \frac{\varphi_i}{\delta t} \quad (2.35)$$

Ainsi, en mettant en relation les équations (2.33), (2.34) et (2.35), on peut dire que :

$$R_{dyn_i} = \frac{L_{R_i}}{\varphi_i} \quad (2.36)$$

Il reste donc à calculer les deux paramètres, à savoir L_{R_i} qui est la longueur de l'aire de contact et φ_i qui est l'angle de l'aire de contact. Les relations géométriques suivantes [Kiencke et Nielsen 2000] sont déduites de la Fig. 2.13.

$$\begin{aligned} R_{stat_i} &= R_{0_i} \cos \varphi_i \\ L_{R_i} &= R_{0_i} \sin \varphi_i \end{aligned} \quad (2.37)$$

On en conclut que :

$$R_{e_i} = \frac{R_{0_i} \sin(\arccos(\frac{R_{stat_i}}{R_{0_i}}))}{\arccos(\frac{R_{stat_i}}{R_{0_i}})} \quad (2.38)$$

En utilisant le théorème de Pythagore sur la même figure, on aura : $R_{0_i}^2 = L_{R_i}^2 + (R_{0_i} - \Delta R_i)^2$. En posant $R_0^2 \gg \Delta R^2$, on obtient : $L_{R_i}^2 = 2R_{0_i}\Delta R_i$. Ce qui donne :

$$R_{e_i} = \frac{\sqrt{2R_{0_i}\Delta R_i}}{\arccos(\frac{R_{stat_i}}{R_{0_i}})} \quad (2.39)$$

La Fig.2.14 présente le résultat de l'estimation du rayon de développement dans un essai de freinage et de parcours en forme de "8" à vitesse constante, respectivement Fig.2.14-b et Fig.2.14-a.

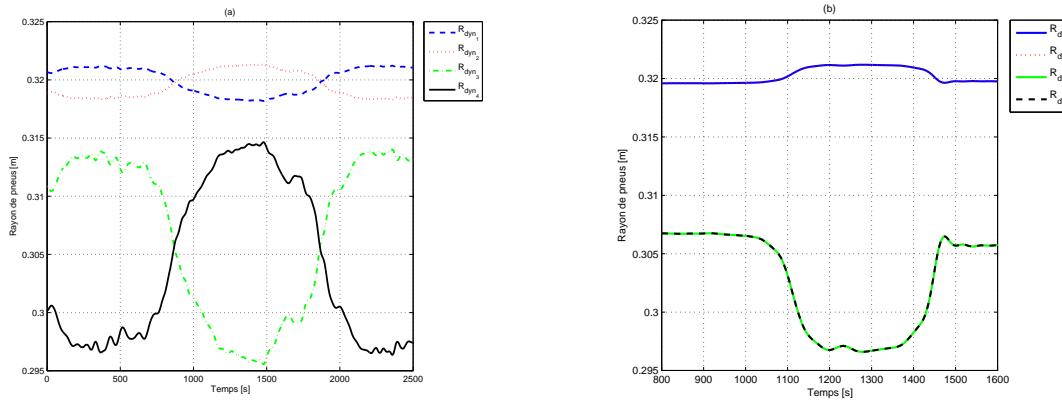


FIG. 2.14 – Rayon de développement en freinage longitudinal (b) et parcours double-circulaire (forme de 8) (a) à vitesse constante

Vitesse aux point de contact pneumatique chaussée : Les vitesses du point de contact pneumatique/chaussée V_{A_i} [Mam02, Sté04b] sont données par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{V_{A_1}} = \begin{pmatrix} V_x - \dot{\psi} L_1^G \sin \varphi_1 \\ V_y + \dot{\psi} L_1^G \cos \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} V_x - \frac{S_f}{2} \dot{\psi} + (\dot{\delta}_1 + \dot{\psi}) \eta_1 \sin \delta_1 \\ V_y + l_f \dot{\psi} - (\dot{\delta}_1 + \dot{\psi}) \eta_1 \cos \delta_1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{V_{A_2}} = \begin{pmatrix} V_x + \dot{\psi} L_2^G \cos \varphi_2 \\ V_y + \dot{\psi} L_2^G \sin \varphi_2 \\ 0 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} V_x + \frac{S_f}{2} \dot{\psi} - (\dot{\delta}_2 + \dot{\psi}) \eta_2 \sin \delta_2 \\ V_y + l_f \dot{\psi} - (\dot{\delta}_2 + \dot{\psi}) \eta_2 \cos \delta_2 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{V_{A_3}} = \begin{pmatrix} V_x - \dot{\psi} L_3^G \cos \varphi_3 \\ V_y - \dot{\psi} L_3^G \sin \varphi_3 \\ 0 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} V_x - \frac{S_r}{2} \dot{\psi} + (\dot{\delta}_3 + \dot{\psi}) \eta_3 \sin \delta_3 \\ V_y - l_f \dot{\psi} + (\dot{\delta}_3 + \dot{\psi}) \eta_3 \cos \delta_3 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{V_{A_4}} = \begin{pmatrix} V_x + \dot{\psi} L_4^G \sin \varphi_4 \\ V_y - \dot{\psi} L_4^G \cos \varphi_4 \\ 0 \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} V_x + \frac{S_r}{2} \dot{\psi} - (\dot{\delta}_4 + \dot{\psi}) \eta_4 \sin \delta_4 \\ V_y - l_f \dot{\psi} + (\dot{\delta}_4 + \dot{\psi}) \eta_4 \cos \delta_4 \\ 0 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (2.40)$$

L_i^G est la distance entre le centre de gravité et le point de contact pneumatique/chaussée de la roue i , φ_i est l'angle entre la direction longitudinale du véhicule et la droite passant par le point de contact pneumatique chaussée (A_i) et le centre de gravité (G), et η_i est la distance entre le point A_i et la projection verticale du centre de la roue (origine du repère lié à la roue i), comme le montre la figure 2.15.

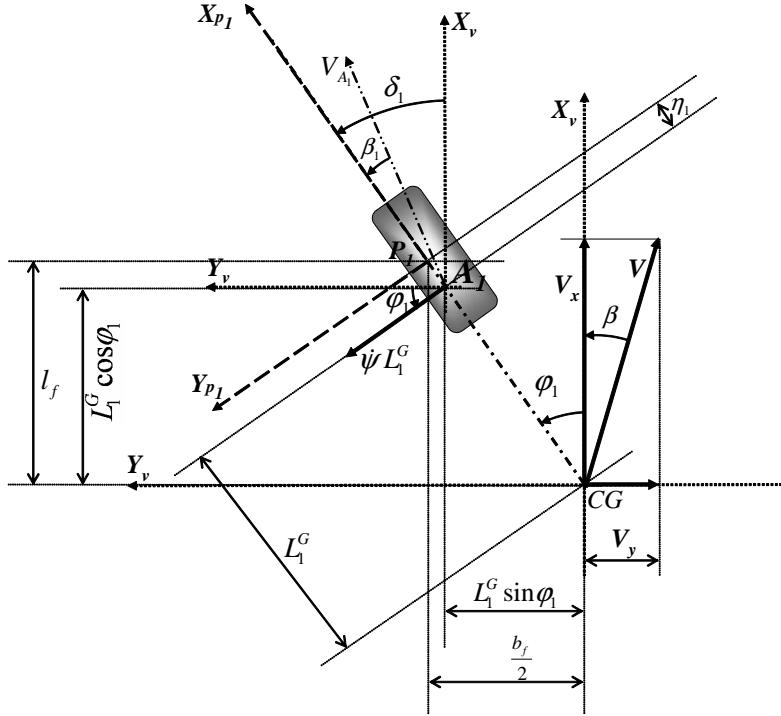


FIG. 2.15 – Vitesse du point de contact pneumatique chaussée

Glissements transversaux (angles de dérive)

Lorsqu'une roue est soumise à une force latérale (vent, force centrifuge, etc.), les flancs de l'enveloppe se déforment, le plan moyen de la roue ne passe plus par le point de contact central de la bande de roulement avec le sol. La bande de roulement se déforme, sa trajectoire n'est plus confondue avec celle de la roue. Ces deux trajectoires forment entre elles un angle appelé angle de dérive (α_i).

Si on néglige la variation de la position du centre de gravité (G) et les variations des positions des pneumatiques par rapport à G , les angles de dérive pour les quatre pneus s'écrivent comme suit [Mam02, Bev01, Sho07] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \delta - \arctan\left(\frac{V_{y1} + l_f \dot{\psi}}{V_{x1} - \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_2 = \delta - \arctan\left(\frac{V_{y2} + l_f \dot{\psi}}{V_{x2} + \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_3 = -\arctan\left(\frac{V_{y3} - l_r \dot{\psi}}{V_{x3} - \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_4 = -\arctan\left(\frac{V_{y4} - l_r \dot{\psi}}{V_{x4} + \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \end{array} \right. \quad (2.41)$$

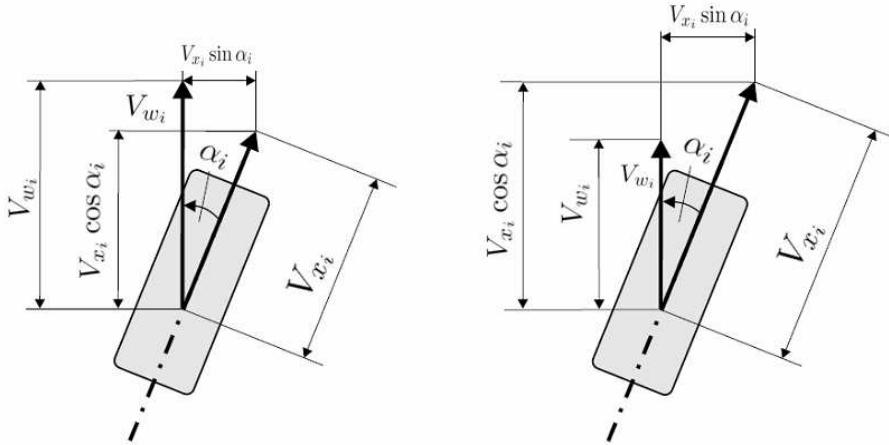


FIG. 2.16 – Angles de dérive des pneus selon Burchardt

où V_{ω_i} est la vitesse de translation du pneu i , V_{xi} et V_{yi} ($i = 1, \dots, 4$) sont respectivement la vitesse longitudinale et la vitesse latérale de pneu i . Ces vitesses sont calculées par l'équation suivante :

$$V_{P_i} = V_x + \Omega_a \wedge P_i$$

avec Ω_a le vecteur des vitesses angulaires et P_i la position de pneu i dans le repère véhicule \mathbf{R}_v .

$$\Omega_a = (\dot{\phi}_v \quad \dot{\theta}_v \quad \dot{\psi})^T, \quad P_i = (x_{v_i} \quad y_{v_i} \quad z_{v_i})^T$$

2.2.7 Moments de la caisse suspendue et moment de lacet

Les moments de la partie suspendue du véhicule sont le moment de roulis et le moment de tangage.

Moment de roulis

Le roulis est le mouvement de la caisse autour de l'axe \mathbf{X}_c , provoqué par les forces centrifuges ou par les forces de vent latéral. Lorsqu'un véhicule aborde un virage, il reçoit du sol des efforts de guidage dirigés vers le centre du virage, les valeurs respectives de ces efforts de guidage dépendent de la situation de dérive de chacun des pneumatiques [Hie04]. La Fig. 2.17 montre un schéma détaillé des différentes forces et les couples autour de l'axe \mathbf{X}_c agissant sur un véhicule.

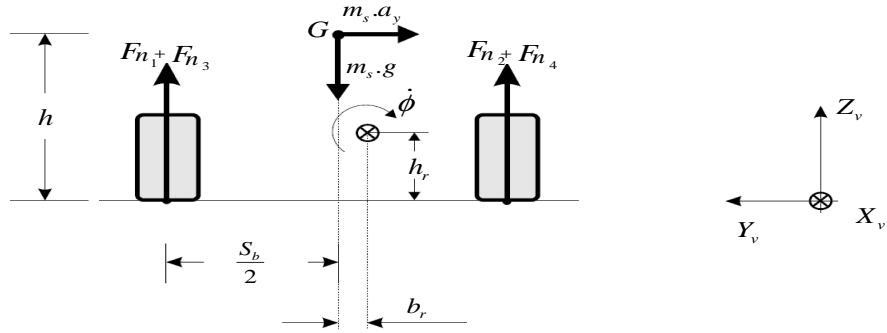


FIG. 2.17 – Résultante des forces extérieures autour de l'axe de roulis

Si on considère que l'axe de roulis est parallèle à l'axe longitudinal du véhicule \mathbf{X}_v , de distance latérale b_r et un déplacement vertical de $h - h_r$ par rapport au centre de gravité G , alors l'équation dynamique de ce moment s'écrit :

$$I_x \ddot{\phi}_v = F_{n1} \left(\frac{S_b}{2} + b_r \right) - F_{n2} \left(\frac{S_b}{2} - b_r \right) + F_{n3} \left(\frac{S_b}{2} + b_r \right) - F_{n4} \left(\frac{S_b}{2} - b_r \right) + \dots + m_s \gamma_y (h - h_r) - m_s g b_r \quad (2.42)$$

F_{n_i} $i = 1, \dots, 4$ sont les forces normales appliquées sur les pneumatiques, données par l'équation (2.15). m_s est la masse de la partie suspendue du véhicule. I_x est le moment d'inertie du véhicule par rapport à l'axe \mathbf{X}_v passant par le centre de masse ($kg.m^2$).

Remarque : Nous pouvons aussi exprimer le mouvement de roulis en fonction du moment des barres anti-roulis et le moment des amortisseurs [Ryu04].

Moment de tangage

Le tangage est le mouvement de la caisse autour de l'axe \mathbf{Y}_c , provoqué par les accélérations et freinages du véhicule et par les forces aérodynamiques longitudinales La Fig. 2.18 montre un schéma détaillé des différentes forces agissant sur ce moment.

Si on considère que l'axe de tangage est parallèle à l'axe latéral du véhicule \mathbf{Y}_v , à une distance longitudinale l_T et un déplacement vertical de $h - h_T$ par rapport au centre de gravité G , alors l'équation dynamique du moment du tangage est donnée par (2.43)

$$I_y \ddot{\theta}_v = (F_{n3} + F_{n4})(l_r - l_T) - (F_{n1} + F_{n2})(l_f + l_T) + m_s \gamma_x (h - h_T) - m_s g l_T \quad (2.43)$$

où I_y est le moment d'inertie du véhicule par rapport à l'axe \mathbf{Y}_v passant par le centre de masse.

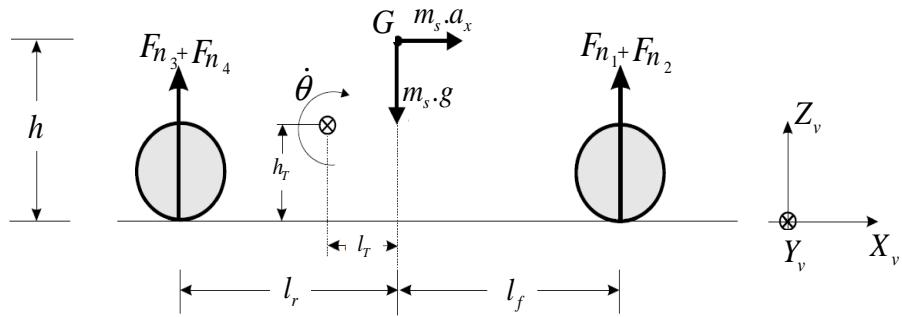


FIG. 2.18 – Résultante des forces extérieures autour de l'axe de tangage.

Moment de lacet

Le mouvement du lacet est un mouvement de pivotement d'un véhicule sur la route, autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité \mathbf{Z}_v .

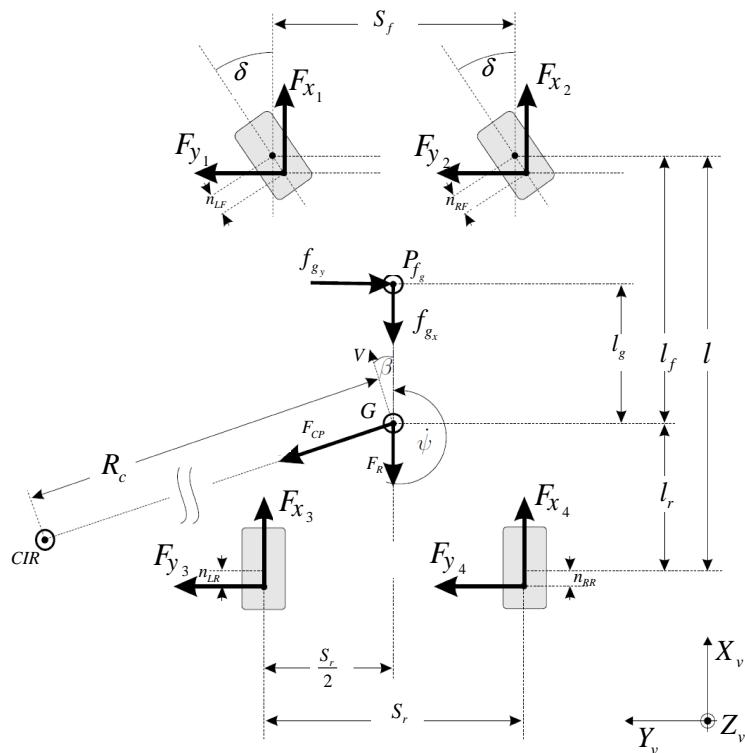


FIG. 2.19 – Résultante des forces extérieures autour de l'axe de lacet.

Le moment du lacet est donné par l'équation suivante :

$$I_z \ddot{\psi} = (l_f - \eta_1 \cos \delta)(F_{n1} + F_{n2}) - (l_f + \eta_3)(F_{n3} + F_{n4}) + \dots + (\frac{S_f}{2})(F_{n2} - F_{n1}) + (\frac{S_r}{2})(F_{n4} - F_{n3}) - l_g f_{g_y} \quad (2.44)$$

I_z est le moment d'inertie du véhicule par rapport à l'axe \mathbf{Z}_v .

Dynamique verticale du véhicule

Dans le repère \mathbf{R}_v , le véhicule se déplace vers le haut et vers le bas en réaction à la géométrie de la route (présence de pente (θ_r), de dévers (ϕ_r) ou d'un uni (U_r) non nuls), ou aux mouvements du véhicule (accélération/freinage, \dots) [Imi03, Rab05a] :

$$ma_z = \Sigma F_{ni} - mg \cos \theta_r \cos \phi_r \quad (2.45)$$

2.2.8 Modélisation de la suspension

Chaque suspension relie une des quatre roues indépendantes à l'un des quatre coins du châssis (voir Fig. 2.20). Le mécanisme de suspension est composé des éléments suivants : ressort, amortisseur, barre anti-roulis ainsi que les différents organes géométriques et structurels assurant la liaison roue/châssis [Imi03, Bro06].

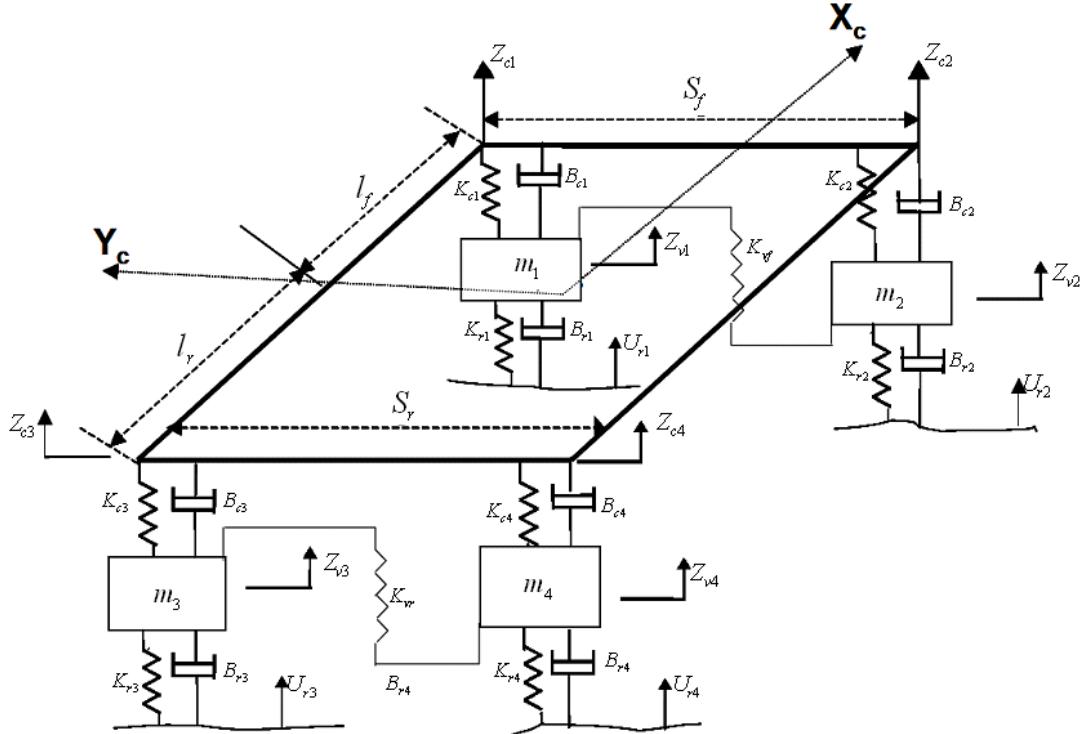


FIG. 2.20 – Représentation de la suspension du véhicule.

Le système est composé de quatre entrées inconnues U_{ri} , $i = 1, \dots, 4$ représentant les excitations induites par la chaussée (la géométrie de la route est non plane). Les quatre suspensions représentées par des systèmes masse-ressort de coefficients de raideur K_{ci} , $i = 1, \dots, 4$ et de coefficient d'amortissement, B_{ci} , $i = 1, \dots, 4$. Z_{vi} , $i = 1, \dots, 4$ représente le déplacement vertical de la masse m_i (roue i). Les équations qui régissent le déplacement vertical de ces roues par rapport au repère véhicule, en appliquant le principe fondamental de la dynamique sur chaque masse sont :

$$\begin{cases} m_i \ddot{Z}_{vi} = -F_{kr_i} - F_{br_i} + K_{ri}(U_{ri} - Z_{vi}) + B_{ri}(\dot{U}_{ri} - \dot{Z}_{vi}), & i = 1, 2 \\ m_i \ddot{Z}_{vi} = -F_{kf_i} - F_{bf_i} + K_{ri}(U_{ri} - Z_{vi}) + B_{ri}(\dot{U}_{ri} - \dot{Z}_{vi}), & i = 3, 4 \end{cases} \quad (2.46)$$

avec, F_{kr_i} et F_{br_i} , $i = 1, \dots, 2$ désignent respectivement la force due aux raideurs et la force due à l'amortisseur de la roue arrière i . F_{kr_i} , F_{br_i} , $i = 3, \dots, 4$ désignent respectivement la force due à la raideurs et la force due à l'amortisseur de la roue avant i .

Les débattements de la caisse Z_{ci} , $i = 1, \dots, 4$ sont fonction des angles ϕ_v , θ_v et du déplacement vertical \bar{Z} comme le montre le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} Z_{c1} & = & \bar{Z} - \frac{S_f}{2} \sin \phi_v - l_f \sin \theta_v \\ Z_{c2} & = & \bar{Z} + \frac{S_f}{2} \sin \phi_v - l_f \sin \theta_v \\ Z_{c3} & = & \bar{Z} - \frac{S_r}{2} \sin \phi_v + l_f \sin \theta_v \\ Z_{c4} & = & \bar{Z} + \frac{S_r}{2} \sin \phi_v + l_f \sin \theta_v \end{array} \right. \quad (2.47)$$

2.2.9 Bilan des forces

Le calcul des forces d'inertie représentées par le premier membre de l'équation de Newton (2.48) s'obtient en affectant le coefficient m (masse totale du véhicule) aux termes ne contenant pas de mouvement de roulis et le coefficient m_s (masse suspendue du véhicule) aux termes contenant le mouvement de roulis représenté par l'angle ϕ_v , dans le repère véhicule [Hie04]. En effet, le mouvement de roulis affecte uniquement la masse suspendue.

$$\left\{ \begin{array}{lcl} m\dot{V} \cos \delta - mV(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \sin \beta + m_s h \ddot{\psi} \sin \phi + \dots & = & \sum F_X^v - C_x V_x^2 - \dots \\ \dots + 2m_s h \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \phi & & \dots - mg \sin \theta_r \cos \phi_r \\ m\dot{V} \sin \delta + mV(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \cos \beta + m_s h \dot{\psi}^2 \sin \phi + \dots & = & \sum F_Y^v - C_y V_y^2 - \dots \\ \dots + m_s h (\dot{\phi}^2 \sin \phi - \ddot{\phi} \cos \phi) & & \dots - mg \sin \phi_r \cos \theta_r \end{array} \right. \quad (2.48)$$

avec :

$$\sum F_X^v = (F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta + (F_{x3} + F_{x4}) \cos \beta + (F_{y3} + F_{y4}) \sin \beta \quad (2.49)$$

$$\sum F_Y^v = (F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta - (F_{x3} + F_{x4}) \sin \beta + (F_{y3} + F_{y4}) \cos \beta \quad (2.50)$$

Expression finale du modèle du véhicule

Après avoir présenté les différents efforts et moments extérieurs agissant sur le véhicule, on donne le système d'équations décrivant les mouvements de translation et de rotation du véhicule (système 2.51).

$$\left\{ \begin{array}{lcl} m\dot{V} \cos \delta - mV(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \sin \beta + m_s h \ddot{\psi} \sin \phi + \dots & = & \sum F_X^v - C_x V_x^2 - \dots \\ \dots + 2m_s h \dot{\phi} \dot{\psi} \cos \phi & & \dots - mg \sin \theta_r \cos \phi_r \\ m\dot{V} \sin \delta + mV(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \cos \beta + m_s h \dot{\psi}^2 \sin \phi + \dots & = & \sum F_Y^v - C_y V_y^2 - \dots \\ \dots + m_s h (\dot{\phi}^2 \sin \phi - \ddot{\phi} \cos \phi) & & \dots - mg \sin \phi_r \cos \theta_r \\ I_x \ddot{\phi} = F_{n1} \left(\frac{S_b}{2} + b_r \right) - F_{n2} \left(\frac{S_b}{2} - b_r \right) + F_{n3} \left(\frac{S_b}{2} + b_r \right) - \dots & & \dots - F_{n4} \left(\frac{S_b}{2} - b_r \right) + m_s \gamma_y (h - h_r) - m_s g b_r \\ I_z \ddot{\psi} = (l_f - \eta_1 \cos \delta) (F_{n1} + F_{n2}) - (l_f + \eta_3) (F_{n3} + F_{n4}) + \dots & & \dots + \left(\frac{S_f}{2} \right) (F_{n2} - F_{n1}) + \left(\frac{S_r}{2} \right) (F_{n4} - F_{n3}) - l_g f_{g_y} & & \end{array} \right. \quad (2.51)$$

2.3 Modèles simplifiés du véhicule

Le modèle non linéaire présenté précédemment présente de nombreuses fortes non-linéarités, ce qui rend son application très difficile en termes de temps de calcul, si on veut faire exécuter les algorithmes en temps réel. En effet, dans les chapitres suivants portant sur la conception d'observateurs, on est obligé de faire des opérations mathématiques très complexes telles que le calcul des dérivées, le calcul de matrices jacobienes, des changements de repères, des produits vectoriel.... Pour pallier ce problème, on propose des modèles simplifiés qui représentent le modèle complet sous certains angles (domaine de validité des contraintes supposé). Avec de tels modèles, la synthèse d'observateurs est plus aisée et le temps de calcul est plus réduit. On donne ci-dessous les différents modèles simplifiés et leur domaine de validité.

2.3.1 Modèle non linéaire à quatre roues

Le modèle du véhicule non linéaire [Seb08b, Sen07b, Gla04, Chi06] à quatre roues est relativement complet. Il est couramment utilisé dans le domaine de la simulation.

Pour obtenir ce modèle, les hypothèses suivantes sont considérées.

- Les mouvements du véhicule sont limités aux translations longitudinale et latérale ainsi qu'à la rotation en lacet. Nous ne prenons pas en compte le mouvement de roulis (la rotation de la partie suspendue du véhicule autour de l'axe \mathbf{X}_c est supposée nulle).
- Les angles de dérive des pneumatiques et du véhicule sont considérés petits, ($\sin \beta = \beta$, $\cos \beta = 1$, $\sin \alpha_i = \alpha_i$ et $\cos \alpha_i = 1$ $i = 1, \dots, 4$).
- Les quantités η_1 , η_2 , η_3 et η_4 sont considérées toutes égales à zéro, c'est-à-dire le point de contact entre le pneu et la chaussée est ramené au projection du centre de pneu sur la route.

Sous ces conditions, les différentes forces et leurs points d'application sont montrés sur la Fig.2.21. Les équations d'évolution du modèle non linéaire du véhicule à quatre roues sont données par le système d'équations différentielles (2.52).

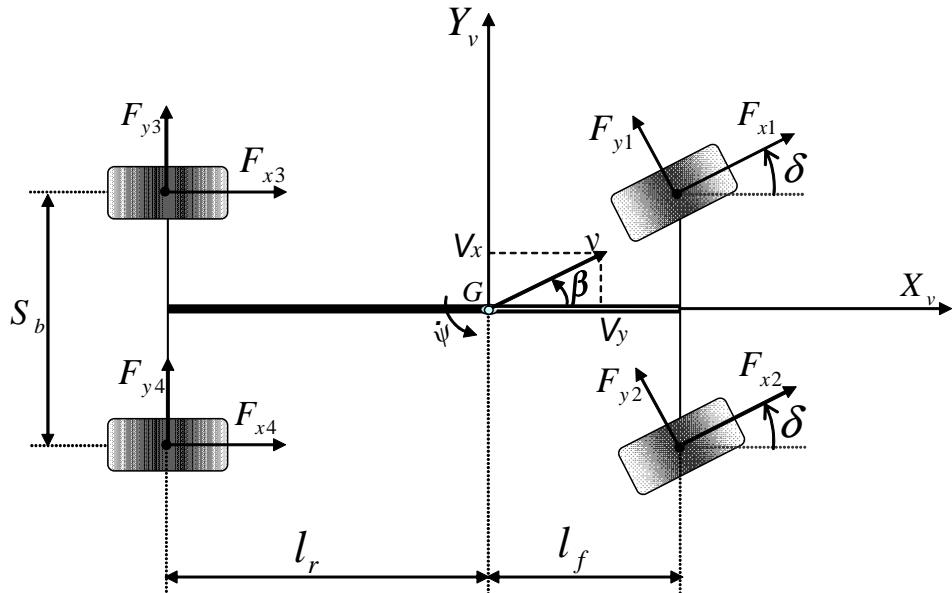


FIG. 2.21 – Véhicule et forces extérieures

$$\begin{cases} m\dot{V}_x &= \sum F_{X_i} + m\dot{\psi}V_y - C_x V_x^2 - mg \sin \theta_r \cos \phi_r \\ m\dot{V}_y &= \sum F_{Y_i} - m\dot{\psi}V_x - C_y V_y^2 - mg \cos \theta_r \sin \phi_r \\ I_z \ddot{\psi} &= \sum M_{Z_i} \end{cases} \quad (2.52)$$

avec

$$\sum M_{Z_i} = l_f \cos \delta (F_{n1} + F_{n2}) - l_f (F_{n3} + F_{n4}) + \frac{S_f}{2} (F_{n2} - F_{n1}) + \frac{S_r}{2} (F_{n4} - F_{n3}) - l_g f_{g_y}$$

Le vecteur d'état x_{nl} de ce modèle est composé des vitesses longitudinale, latérale et de lacet. Son vecteur d'entrées u_{nl} est constitué de l'angle de braquage et des vitesses angulaires des quatre roues.

$$\begin{aligned} x_{nl} &= [V_x \quad V_y \quad \dot{\psi}] \\ u_{nl} &= [\delta \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4] \end{aligned}$$

2.3.2 Modèle linéaire type Bicyclette

Le modèle bicyclette linéaire est dérivé du modèle global précédent dans lequel tous les angles de dérive sont supposés être petits [Ryu04, Ryu04b, Bro01], les deux angles de dérive sur le même essieu égaux ($(\alpha_f = \alpha_1 = \alpha_2)$ et $(\alpha_r = \alpha_3 = \alpha_4)$). Le mouvement de roulis est modélisé en prenant en compte des barres anti roulis. Une autre hypothèse admet l'égalité de la rigidité en virage sur les deux roues avant ($\frac{C_{sf}}{2} = C_{yy1} = C_{yy2}$) et les roues arrière ($\frac{C_{sr}}{2} = C_{yy3} = C_{yy4}$). Dans ce modèle, la vitesse longitudinale est considérée comme un paramètre variable. La Fig.2.22 donne une représentation schématique de ce modèle. F_{yf} et F_{yr} sont les forces latérales avant et arrière, α_f et α_r sont les angles de dérive des pneumatiques avant et arrière respectivement. On suppose aussi que le véhicule ne réalise pas de mouvement de tangage, car ce mode fait partie de la dynamique longitudinale puisqu'il est principalement dû aux sollicitations d'accélération et de freinage. Il est également supposé que le véhicule est soumis à des perturbations : une force de vent latérale f_g agissant à une distance l_g du centre de gravité.

En situation de conduite normale, lorsque le pneumatique est faiblement sollicité, les forces latérales (F_{yf}, F_{yr}) sont proportionnelles aux angles de dérive des pneus (α_f, α_r). Leurs expressions sont les suivantes :

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{sf}\alpha_f = C_{sf} \left(\delta - \beta - \frac{l_f \dot{\psi}}{V} \right) \\ F_{yr} = C_{sr}\alpha_r = -C_{sr} \left(\beta - \frac{l_r \dot{\psi}}{V} \right) \end{cases} \quad (2.53)$$

$\dot{\psi}$ est la vitesse de lacet, C_{sf} et C_{sr} sont respectivement les raideurs des pneumatiques avant et arrière.

Les équations du modèle [Ryu04, Tse01, Tse99], sous les hypothèses précédemment citées, sont :

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= -\frac{I_e C_0}{I_x m V} \beta - \left(1 + \frac{I_e C_1}{I_x m V^2} \right) \dot{\psi} + \frac{h_r (mgh_r - k_r)}{I_x V} \phi_v \\ &\quad - \frac{h_r l_r}{I_x V} \dot{\phi}_v + \frac{I_e C_{sf}}{I_x m V} \delta - \frac{g}{V} \phi_r + \frac{1}{m v} f_g \\ \ddot{\psi} &= -\frac{C_1}{I_z} \beta - \frac{C_2}{I_z V} \dot{\psi} + \frac{l_f C_{sf}}{I_z} \delta + \frac{l_g}{I_z} f_g \\ \ddot{\phi}_v &= -\frac{C_0 h_r}{I_x} \beta - \frac{C_1 h_r}{I_x V} \dot{\psi} + \frac{mgh_r - k_r}{I_x} \phi_v - \frac{b_r}{I_x} \dot{\phi}_v + \frac{C_{sf}}{I_x} \delta \end{aligned} \quad (2.54)$$

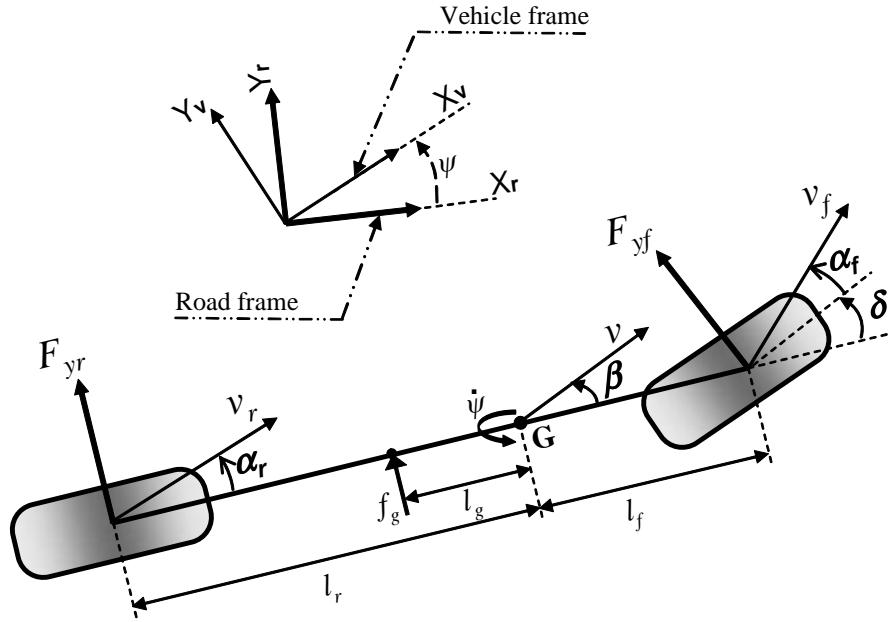


FIG. 2.22 – Représentation bicyclette du véhicule

avec

$$\left| \begin{array}{l} C_0 = C_{sf} + C_{sr} \\ C_1 = l_f C_{sf} - l_r C_{sr} \\ C_2 = l_f^2 C_{sf} + l_r^2 C_{sr} \\ I_e = I_x + m h_r^2 \end{array} \right.$$

k_r est le coefficient de rigidité en roulis et b_r est le coefficient d'amortissement de la barre anti-roulis. h_r est la hauteur de l'axe de roulis par rapport au centre de gravité (G).

Partant des équations du système (2.54), la représentation linéaire suivante à quatre états est obtenue :

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u} + \bar{B}_{w1}\phi_r + \bar{B}_{w2}f_g \quad (2.55)$$

avec

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -\frac{I_e C_0}{I_x m V} & -1 - \frac{I_e C_1}{I_x m V^2} & \frac{h_r(mgh_r - k_r)}{I_x V} & -\frac{h_r l_r}{I_x V} \\ -\frac{C_1}{I_z} & -\frac{C_2}{I_z V} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{C_0 h_r}{I_x} & -\frac{C_1 h_r}{I_x V} & \frac{mgh_r - k_r}{I_x} & -\frac{b_r}{I_x} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{I_e C_{sf}}{I_x m V} \\ \frac{l_f C_{sf}}{I_z} \\ 0 \\ \frac{C_{sf}}{I_x} \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{w1} = \begin{bmatrix} -\frac{g}{V} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{w2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m v} \\ \frac{l_g}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les variables d'état de ce modèle sont :

$$\bar{x} = [\beta \ \dot{\psi} \ \phi_v \ \dot{\phi}_v]^T$$

et son vecteur d'entrée est constitué d'une entrée connue (l'angle de braquage) et de deux entrées inconnues (la force de vent latéral f_g et l'angle de dévers ϕ_r).

2.3.3 Modèle vertical de la suspension

Nous avons vu que, du point de vue de la dynamique verticale, la liaison entre la masse suspendue du véhicule et la masse non suspendue est représentée comme l'indique la fig.2.23. Il y a d'une part quatre ressorts de raideur k_1 et de longueur L_{10} à l'avant et k_2 et de longueur L_{20} à l'arrière et d'autre part quatre amortisseurs de caractéristiques b_1 à l'avant et b_2 à l'arrière.

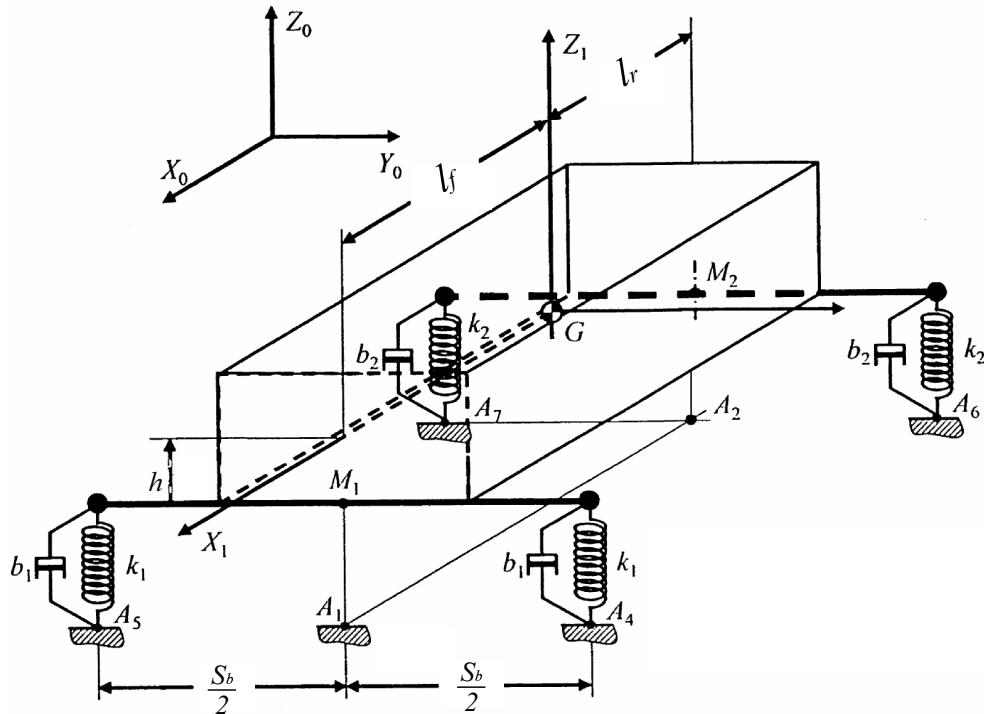


FIG. 2.23 – Modèle de suspension

Si l'on admet que le plan de symétrie du véhicule reste dans un plan vertical fixe, on peut modéliser le système de suspension par une représentation plane [Bro06] visible sur la fig.2.24.

L'application du théorème de la somme dynamique sur le système en projection sur l'axe vertical Z_a donne :

$$\begin{aligned} -2k_1(z - l_f\theta_v - c_1 - L_{10}) - 2b_1(\dot{z} - l_f\dot{\theta}_v) \\ -2k_2(z + l_r\theta_v - c_2 - L_{20}) - 2b_2(\dot{z} + l_r\dot{\theta}_v) - mg &= m\ddot{z} \end{aligned} \quad (2.56)$$

En repérant le véhicule par rapport à la position stationnaire ($z = z^*$ et $\theta_v = \theta_v^*$), lorsque l'accélération est nulle et en utilisant le changement de variable :

$$z = z^* + \bar{z}, \theta_v = \theta_v^* + \bar{\theta}_v, \dot{z} = \dot{\bar{z}}, \dot{\theta}_v = \dot{\bar{\theta}}_v \text{ et } \ddot{z} = \ddot{\bar{z}}$$

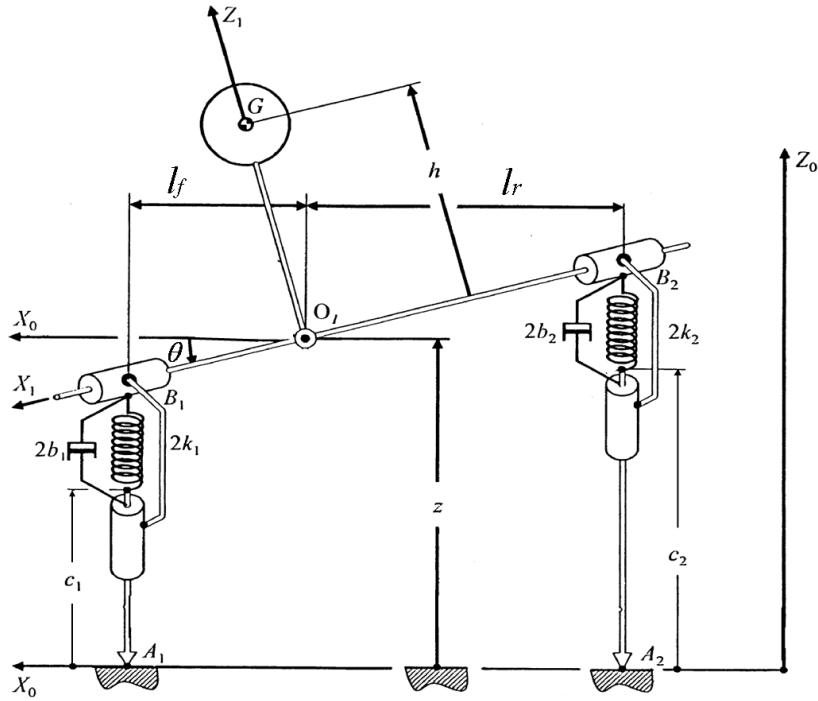


FIG. 2.24 – Représentation plane de la suspension

la position stationnaire est définie par :

$$2k_1(z^* - l_f\theta_v - c_1 - L_{10}) + 2k_2(z^* - l_r\theta_v^* - c_2 - L_{20}) + mg = 0 \quad (2.57)$$

Compte tenu de l'équation (2.57), l'équation (2.56) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} m\ddot{z} + (2k_1 + 2k_2)\bar{z} - (2k_1l_f - 2k_2l_r)\bar{\theta}_v &= 0 \\ +(2b_1 + 2b_2)\dot{\bar{z}} - (2b_1l_f - 2b_2l_r)\bar{\theta}_v & \end{aligned} \quad (2.58)$$

Le théorème du moment dynamique appliqué au point G (centre de gravité) en projection sur l'axe Y_0 donne :

$$\begin{aligned} 2k_1(z - l_f\theta_v - c_1 - L_{10})l_f - 2b_1(\dot{z} - l_f\dot{\theta}_v)l_f \\ - 2k_2(z + l_r\theta_v - c_2 - L_{20})l_r \\ - 2b_2(\dot{z} + l_r\dot{\theta})l_r - mh\gamma_x &= I_y\ddot{\theta}_v \end{aligned} \quad (2.59)$$

Dans l'état stationnaire d'accélération nulle, nous avons aussi :

$$2k_1(z^* - l_f\theta_v^* - c_1 - L_{10})l_f - 2k_2(z^* + l_r\theta_v^* - c_2 - L_{20})l_r = 0 \quad (2.60)$$

L'équation (2.60) combinée au changement de variable introduit précédemment permet de réécrire l'équation (2.59) sous la forme :

$$\begin{aligned} (2k_1l_f^2 + 2k_2l_r^2)\bar{\theta}_v + (2b_1l_f^2 + 2b_2l_r^2)\bar{\theta}_v \\ -(2k_1l_f - 2k_2l_r)\bar{z} - (2b_1l_f - 2b_2l_r)\dot{\bar{z}} + I_y\ddot{\theta}_v &= mh\gamma_x \end{aligned} \quad (2.61)$$

Les équations (2.58) et (2.61) constituent le système différentiel permettant d'étudier la dynamique longitudinale en réponse à une accélération γ_x , dans le cas d'un faible angle de braquage.

2.4 Identification des paramètres dynamiques

L'identification des paramètres dynamiques du véhicule est articulée autour des trois étapes ci-dessous (voir les détails dans l'annexe B) :

1. **Caractérisation des capteurs** : Cette étape consiste à positionner les capteurs sur le véhicule, ramener les mesures au centre de gravité et identifier les bruits et les offsets de chaque capteurs.
2. **Protocoles de mesures (Choix de trajectoires et essais)** : Dans cette étape, on définit les choix des trajectoires et les commandes du conducteur qui permettent au mieux de solliciter les paramètres à identifier.
3. **Traitement des données et simulations** : Cette étape consiste à appliquer les méthodes d'identification des paramètres et à réaliser les simulations nécessaires.

Les résultats de l'identification sont tous montrés dans l'annexe B.

2.5 Validation du modèle du véhicule

Dans cette partie de validation, nous utilisons une démarche décrite par la représentation schématique sur la Fig. 2.25. Les données d'essais sont composées de commandes du véhicule (accélérations, freinage, angle volant, ...), les données géométriques des pistes d'essais (Pente, dévers, courbure, ...) et les données de comportement du véhicule (acquisition de mesures). En effet sur le véhicule d'essai un ensemble de capteurs (voir Fig. 2.26) est utilisé pour l'acquisition des données, la fréquence d'acquisition varie d'un capteur à l'autre (entre $10Hz$ et $100Hz$). Voir chapitre 7 (équipements, expérimentation et validation), pour plus de détails sur ces capteurs. Parmi ces capteurs, on cite :

- capteur optique d'angle de braquage ;
- capteur de vitesses de rotations des roues ;
- tri-gyromètres et un tri-accéléromètres ;
- 2 capteurs pour les débattements de suspensions (mm)
- Un capteur Correvit. Il mesure les vitesses longitudinale V_x et latérale V_y , et l'angle de dérive du véhicule ;
- Un capteur de la position centimétrique du véhicule (GPS RTK).

Les figures 2.27 et 2.28 représentent respectivement le braquage de deux roues avant (celui des roues arrière est supposé nul) et les vitesses angulaires des quatre pneumatiques. Ce scénario correspond à une conduite normale (vitesse $15m/s$, des accélérations inférieures à $0.5g$ et l'état de la route est humide). Pour ce qui est du comportement du modèle pour des tests en conditions excessives, celui-ci est traité dans le chapitre 7 et l'annexe B. La figure 2.29 représente le résultat de la comparaison entre la vitesse de lacet mesurée et simulée (Fig.2.29-a) et le résultat de la comparaison de la vitesse longitudinale estimée et mesurée (Fig.2.29-b). Les courbes de la figure 2.30-a correspondent à la vitesse latérale mesurée par le capteur Correvit et celle obtenue par le modèle. La figure 2.30-b montre une comparaison entre la mesure et le résultat de simulation de l'angle de dérive. Cet angle est aussi mesuré par le capteur Correvit. Les courbes des glissements longitudinaux et latéraux sont données dans l'annexe C. D'après les résultats des tests de validation, on peut conclure que le modèle étudié représente bien la dynamique du véhicule.

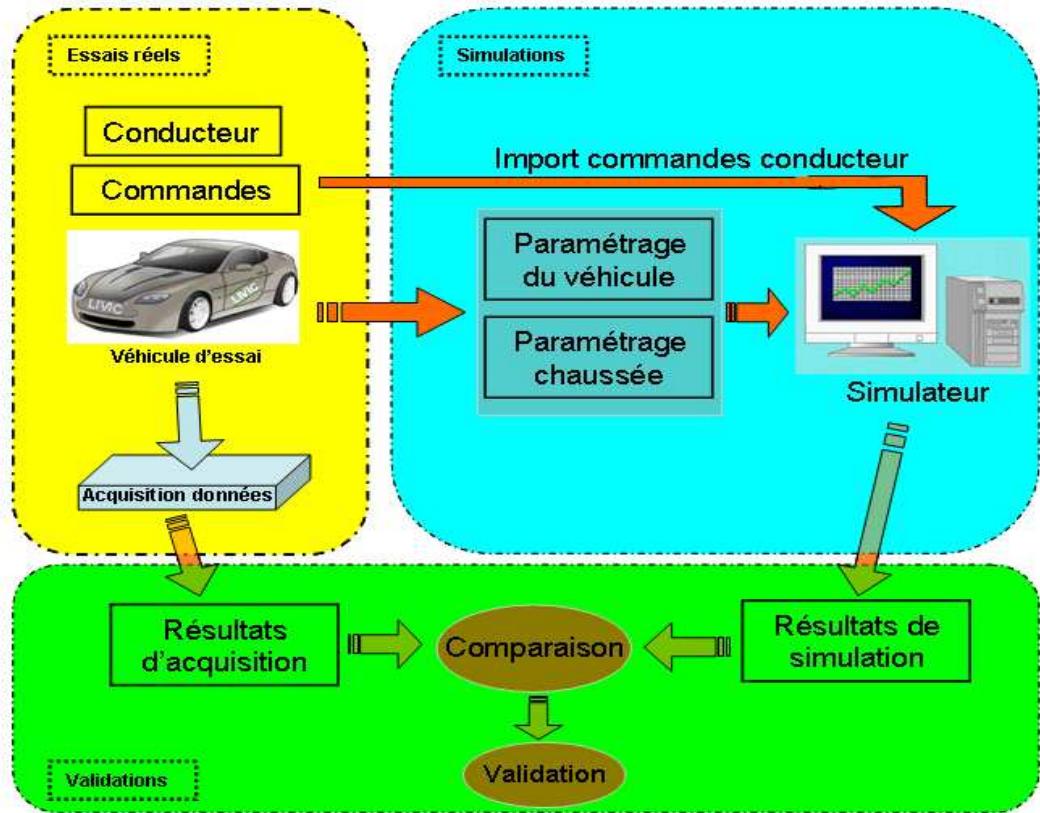


FIG. 2.25 – Schématisation de la démarche des validations

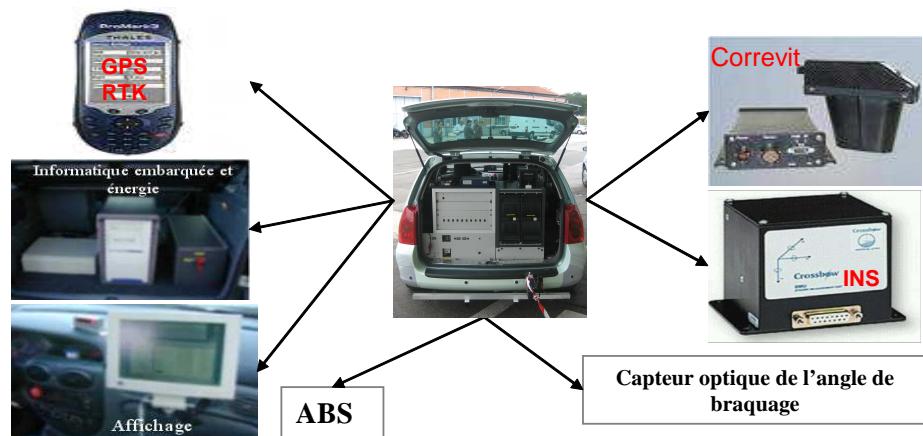


FIG. 2.26 – Véhicule d'essai du LIVIC

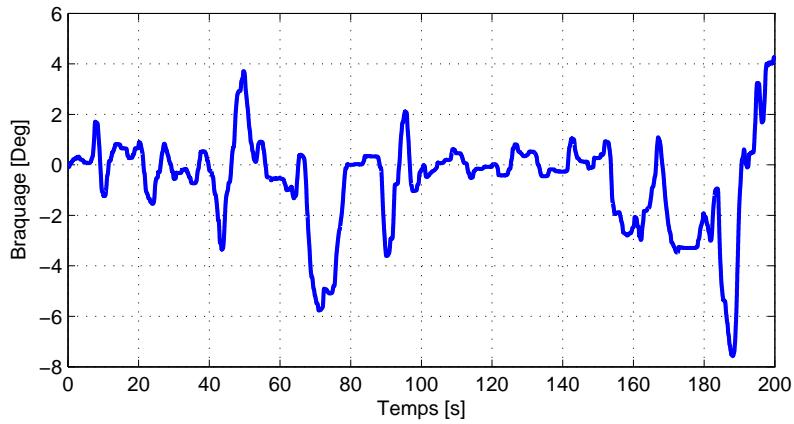


FIG. 2.27 – Le braquage des pneus avant.

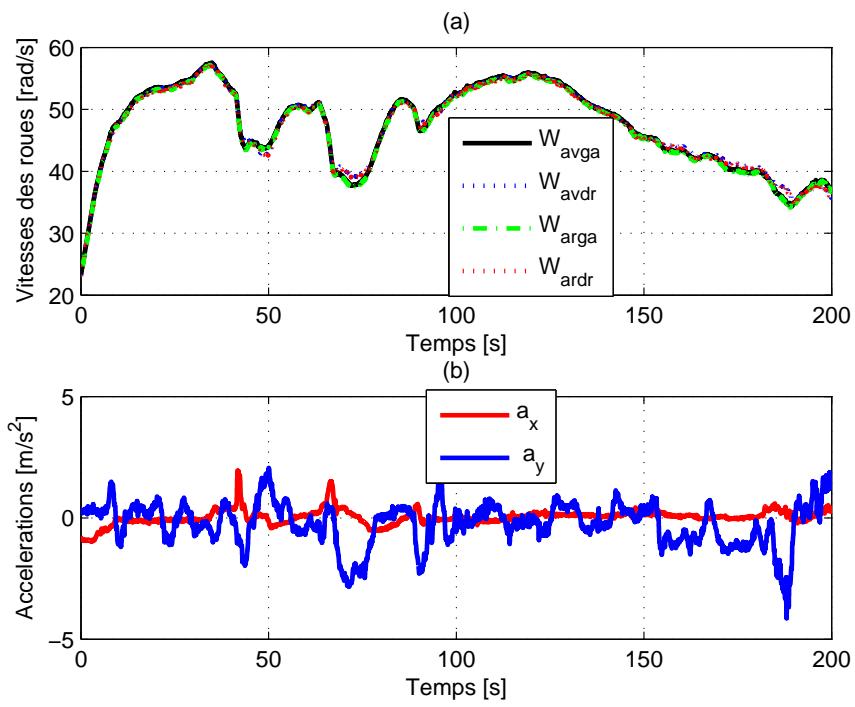


FIG. 2.28 – Vitesses angulaires des pneumatiques et accélération du véhicule.

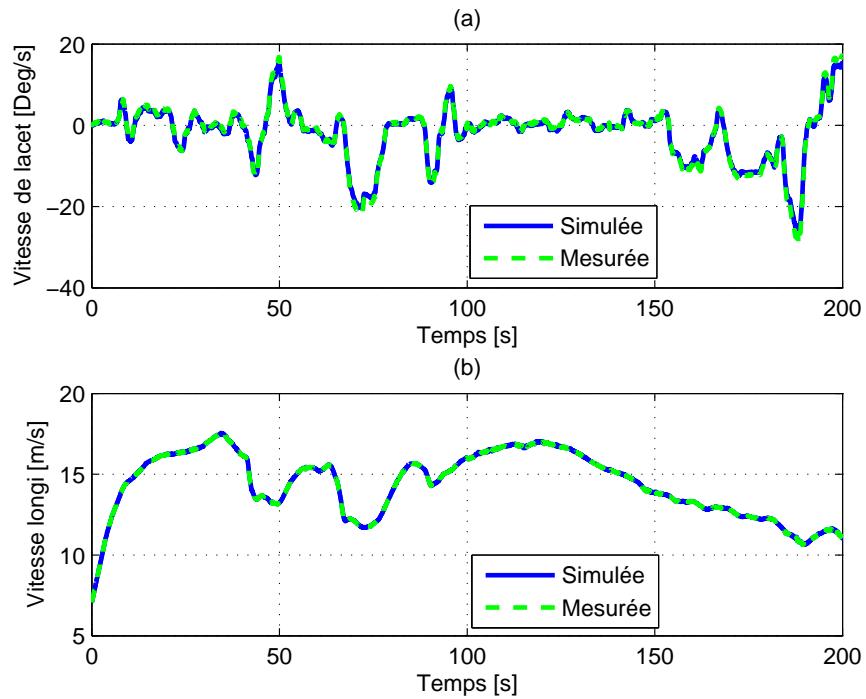


FIG. 2.29 – Vitesse de lacet et vitesse longitudinale estimées et mesurées.

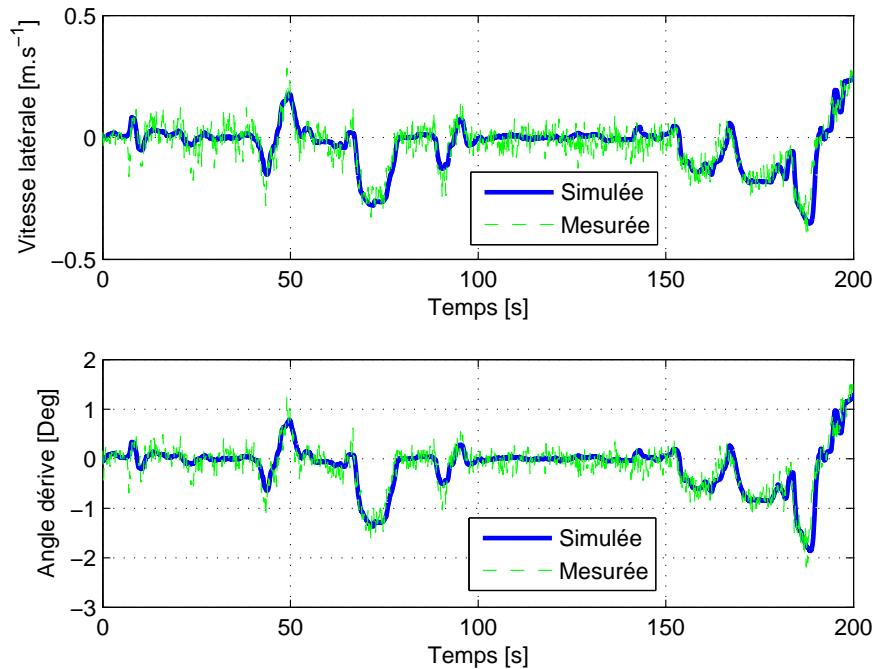


FIG. 2.30 – Vitesse latérale et angle de dérive estimés et mesurés.

2.6 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation cinématique et dynamique détaillée du véhicule à quatre roues. Notre objectif n'était pas de faire une analyse et une étude très approfondie des modèles ni de leurs paramètres dynamiques. Néanmoins cette partie est un passage obligatoire pour la conception d'observateurs, que nous traiterons dans les chapitres suivants.

Dans un premier temps, les différents repères nécessaires pour décrire les mouvements et l'ensemble des efforts appliqués sur le système véhicule sont définis. Ensuite, les forces agissant sur le véhicule, les forces de contact pneumatique chaussée ainsi que les mouvements de la carrosserie ont été considérés pour des besoins de reconstruction de la géométrie de la route par le biais d'observateurs.

Les modèles ont été confrontés aux mesures issues de deux véhicules de type "Peugeot 307" et "Renault Megane". Ces véhicules sont équipés des capteurs nécessaires à d'identifications des paramètres dynamiques et à la validation des modèles, dans les deux cas de conduite normale et de fortes sollicitations de la dynamique du véhicule. Plusieurs sites expérimentaux ont été utilisés.

3

Géométrie de la route : État de l'art

Sommaire

3.1	La courbure	62
3.2	Le devers	64
3.3	La pente	65
3.4	L'uni	65
3.5	La largeur	66
3.6	Conclusions	68

Pour améliorer la sécurité routière, rien ne doit être négligé. Si le bon état de la voiture et la sobriété du conducteur sont essentiels, le tracé de la route ne doit pas non plus être laissé au hasard.

Le tracé d'une route doit répondre à plusieurs contraintes telles que : la distance de visibilité, assurer la stabilité du véhicule, les coûts de construction, la fluidité du trafic et le confort du conducteur... .

En France, trois types de route sont définis par les instructions interministérielles suivantes :

- L'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaisons (ou I.C.T.A.A.L.), pour les infrastructures de type autoroute de liaison (type **L**).
- L'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des routes nationales (I.C.T.A.R.N.) dont le domaine d'action regroupe toutes les routes interurbaines principales qui ne sont pas dépendantes de l'I.C.T.A.A.L., est maintenant remplacée par le document d'aménagement des routes principales (ou A.R.P.) de type **T**.
- L'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (ou I.C.T.A.V.R.U.) qui s'applique à la voirie urbaine principale (artères urbaines et autoroutes urbaines) de type **R**.

Elles donnent des valeurs minimales et maximales de la géométrie de la route en fonction de la dynamique du véhicule, du confort du conducteur et des problèmes de visibilité. Ces instructions définissent pour chaque type de route les trois éléments géométriques à la base de la construction routière : le tracé en plan, qui est la projection de la route sur un plan horizontal, le profil en

long, qui développe les variations de hauteur de la route en fonction de l'abscisse et le profil en travers qui est la coupe de la route suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe. Cette décomposition facilite la vision générale de la route. D'un autre côté, elle ignore les problèmes de couplage au niveau de la dynamique du véhicule.

À ce titre, le rayon de courbure de la route R_r est défini comme une fonction de la vitesse V . Il donne la limite de l'accélération latérale qui assure le confort et la sécurité du conducteur :

$$R_r = \frac{V^2}{g(\phi_r + f(V))} \quad (3.1)$$

où $f(V)$ est une fonction de la vitesse assimilable à l'adhérence mobilisée par le contact pneumatique chaussée et ϕ_r est le dévers. Le tableau 3.1 nous donne la valeur de cette fonction pour les vitesses pour lesquelles les caractéristiques sont calculées.

TAB. 3.1 – $f(V)$ pour les vitesses caractéristiques

$V(km/h)$	40	60	80	100	120	140
$f(V)$	0.25	0.16	0.13	0.11	0.10	0.09

Néanmoins, il est plus simple de définir la route au travers de ses caractéristiques géométriques qu'au travers des différents types proposés. Dans la suite, nous allons décrire les variables qui nous semblent les plus importantes : la courbure, le devers, la pente et la largeur.

3.1 La courbure

C'est un facteur important pour le calcul de la vitesse limite de dérapage pendant la conduite sur les virages.

Géométriquement, la courbure en un point est l'inverse du rayon du cercle le plus tangent à une courbe donnée en ce point. La figure suivante (Fig. 3.1) illustre en pointillé une courbe plane avec le cercle le plus tangent au point M de la courbe. La courbure C_r est donc égale à :

$$C_r = \frac{1}{R_r}, R_r \text{ est le rayon de courbure.}$$

La courbure est pour une trajectoire, la capacité de sa tangente à changer de direction. Plus précisément, nous définissons la courbure locale C_r comme le module de la variation du vecteur tangent par rapport au chemin parcouru ds : $C_r = \frac{d\theta}{ds}$, où $d\theta$ est la variation de l'angle de tangence de la courbe et ds la variation de l'abscisse curviligne. En d'autres termes, on peut considérer la courbure C_r au point M comme une mesure de la "rotation instantanée" de la courbe en M : si, en partant de M , on avance d'une longueur infinitésimale ds , la tangente à la courbe tourne d'un angle $C_r ds$. La courbure est une quantité locale, c'est à dire qu'elle ne dépend pas du système de coordonnées dans lequel elle est calculée.

Les routes peuvent être décrites au travers de trois figures géométriques simples (voir figure 3.2) :

La ligne droite : Caractérisée par une courbure constante et nulle $C_r = 0$.

Le cercle : Caractérisé par une courbure constante non nulle $C_r = C^{ste} \neq 0$.

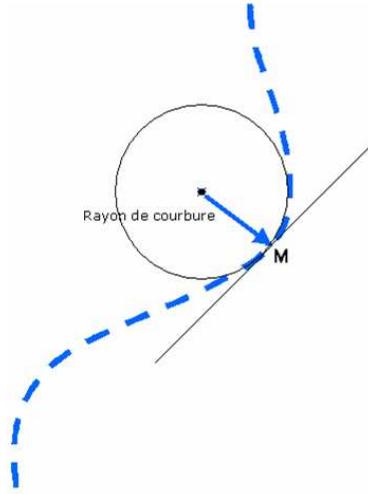


FIG. 3.1 – La courbure et le rayon de courbure

La clohoïde : Pour que la transition entre une ligne droite et un virage soit la plus confortable possible, on a recours à une courbe appelée **clohoïde**, ou **spirale de Cornu**. Elle possède une propriété géométrique essentielle liée à la notion de courbure.

La clohoïde est un type particulier de spirale qui permet d'introduire une variation de la courbure et du dévers en prenant en compte la dynamique du véhicule et le comportement du conducteur. Ainsi, elle permet de raccorder des lignes droites et des cercles avec une variation acceptable de l'accélération latérale et de l'angle de braquage. Cette spirale est conçue pour pouvoir être parcourue à une vitesse constante avec une variation du braquage dont la vitesse angulaire est constante. Pour assurer à la fois le respect de la dynamique du véhicule et du comportement du conducteur, la longueur de ces raccordements est définie comme étant le maximum de trois longueurs (L_{dyn} , L_{gau} et L_{opt} définies ci-dessous) :

Le confort dynamique : Cette condition limite la variation d'accélération latérale, et donc le jerk. Ainsi, le jerk autorisé est de :

$$\frac{\Delta a_y}{\Delta t} = \begin{cases} \frac{g}{50} & : \text{pour toute vitesse sur autoroute} \\ \frac{g}{0.2V} & : \text{sur les autres routes} \end{cases} \quad (3.2)$$

L'accélération latérale est donnée par $\gamma_y = \frac{V^2}{R_r} - g\phi_r$ et le temps pour parcourir la courbe est $t = \frac{L}{V}$. Ainsi, sur autoroute, nous avons une longueur minimale de clohoïde qui est, entre une ligne droite et une courbe de rayon R_r :

$$L_{dyn} = 50V \left(\frac{V^2}{R_r} - g\phi_r \right) \quad (3.3)$$

Le gauchissement de la chaussée : La variation de devers est limitée à 2 degrés par seconde de parcours. Or, pour passer d'une ligne droite à un cercle le dévers doit varier. La longueur obtenue est :

$$L_{gau} = V \frac{\Delta \phi_r}{0.02} \quad (3.4)$$



FIG. 3.2 – Géométrie longitudinale d'une route

Le confort optique : La variation de courbure et surtout la présence d'un raccordement doit être visible pour le conducteur pour que celui-ci puisse adapter sa vitesse. Pour les autoroutes, cela se traduit par la longueur [Gla04] :

$$L_{opt} = \max \left(\frac{R_r}{9}, 14\Delta\phi_r \right) \quad (3.5)$$

La longueur du raccordement sera le maximum des trois longueurs L_{dyn} , L_{gau} et L_{opt} . Néanmoins, pour limiter la succession de courbe de raccordement, cette longueur est limitée suivant le type de route.

3.2 Le dévers

Le dévers d'une route a deux utilités. Tout d'abord, il permet l'évacuation des eaux de pluie lorsque la pente de la route est nulle, aussi le dévers minimum est fixé à 2.5% pour remplir ce rôle en toutes circonstances. Ensuite, il permet de diminuer les sollicitations des pneumatiques en latéral en reprenant une partie de l'accélération latérale. Le dévers maximal autorisé sur les routes est de 7%, la formule (3.1) nous permet de calculer le rayon minimum (R_{min}) pour ce dévers (tableau 3.2). A l'inverse, pour un dévers minimum de 2.5%, le rayon est limité par R_{dm} donné dans le tableau 3.3. Entre les deux rayons R_{min} et R_{dm} , le dévers évolue linéairement en fonction de $\frac{1}{R_r}$ (Fig 3.3).

Remarque : A compter du premier juillet 2007, l'aménagement, en agglomération et en France, des espaces publics et de l'ensemble de la voirie ouverte à la circulation publique et, hors agglomération, des zones de stationnement, des emplacements d'arrêt des véhicules de transport en

TAB. 3.2 – Rayon minimum au dévers maximum

Type	R60	R80,T80 ou L80	T100 ou L100	L120
Rayon minimum (m)	120	240	425	665

TAB. 3.3 – Rayon minimum au dévers minimum

Type	R60	R80,T80 ou L80	T100 ou L100	L120
Rayon au dévers minimum (m)	450	650	900	1500

commun et des postes d'appel d'urgence est réalisé de manière à permettre l'accessibilité de ces voiries et espaces publics aux personnes handicapées ou à mobilité réduite avec la plus grande autonomie possible [SET06]. Dans ce cadre, le dévers en cheminement courant doit être inférieur ou égal à 2%.

3.3 La pente

La pente de la route est un facteur sur lequel il est beaucoup plus difficile d'énoncer des contraintes. En effet, cette pente est principalement due à la topologie du terrain sur lequel la route est construite et aux travaux à engager pour la modifier (déblais ou remblais) ou pour l'éviter (ouvrage d'art) deviennent rapidement très chers.

TAB. 3.4 – Pente maximale en fonction du type de la route

Type	R60	R80,T80 ou L80	T100 ou L100	L120
Pente maximale (%)	7	6	5	5

La pente maximale est fixée à partir de la dynamique du véhicule pour les différents types de routes et est donnée dans le tableau 3.4. Au delà de la pente en elle-même, les variations de cette pente sont soumis à des minima en fonction du confort du conducteur et de la distance de visibilité. Ainsi, l'accélération verticale est limitée à $\frac{g}{40}$.

La considération de la distance de visibilité donne des rayons minimaux en longitudinal (tableau 3.5) : R_{vm} est le rayon minimal saillant calculé pour une visibilité de jour, R'_{vm} est le rayon minimal rentrant pour une visibilité de nuit (en prenant en compte les phares du véhicule).

3.4 L'uni

Cette variable représente les variations de la hauteur de la surface. Ces variations influent directement sur la dynamique verticale du véhicule. La figure 3.4 montre les irrégularités typiques sur un profil routier pour les pneumatiques droite et gauche d'un véhicule. L'uni représenté sur

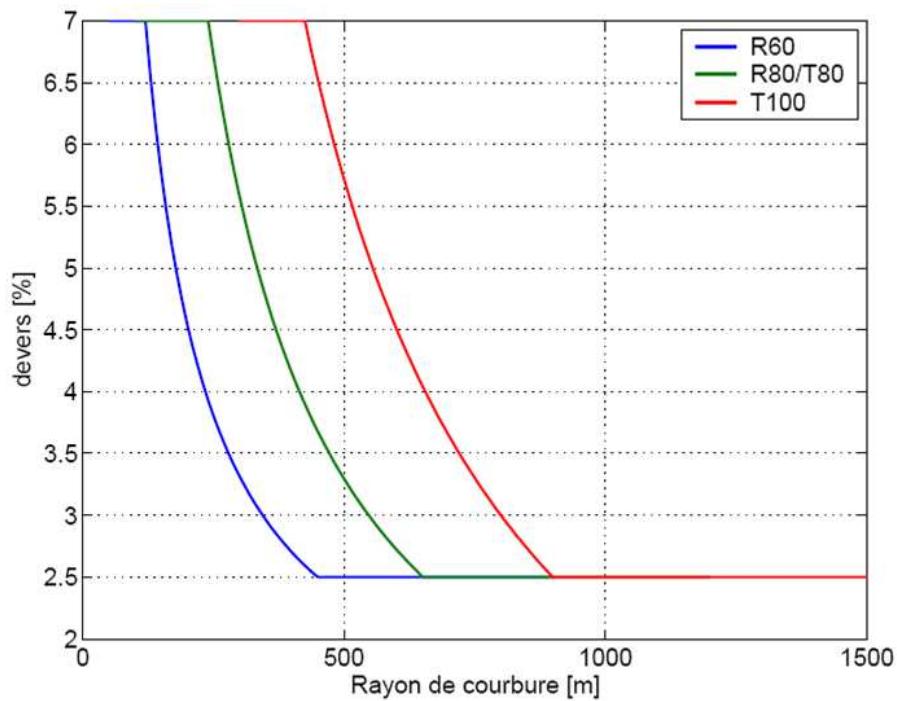


FIG. 3.3 – Évolution du dévers en fonction du rayon de courbure pour les différents types de route

TAB. 3.5 – Rayon minimum en longitudinal pour la visibilité

Type	R60	R80,T80 ou L80	T100 ou L100	L120
R_{vm} (m) (%)	1500	3000	6000	10000
R'_{vm} (m) (%)	1500	2200	3000	4200

la figure 3.4 est relativement bon. Néanmoins, il va entraîner au niveau du pneumatique des variations de la force normale. En faisant rouler un véhicule en ligne droite et à une vitesse constante de $20m.s^{-1}$, la force normale peut varier de près de 5% (figure 3.5). Sur des routes plus dégradées, l'un peut faire varier localement très fortement la force normale, de plus de 50%, diminuant d'autant les forces mobilisables en latéral ou en longitudinal.

3.5 La largeur

Il n'y a pas de largeur minimale réglementaire pour une chaussée. Cette valeur doit être retenue en fonction du type de véhicules circulant ou attendus sur l'itinéraire et des vitesses prévues. Les dimensions maximales des véhicules sont fixées à 2.60 m hors rétroviseur [SET06] : ces derniers peuvent faire une saillie de 20 cm au-dessus de 1.90 m. En pratique la plupart des véhicules légers n'excèdent pas les largeurs suivantes :

- Véhicules légers : 1.70 m.
- Véhicule types "monospace" : 1,90 m.

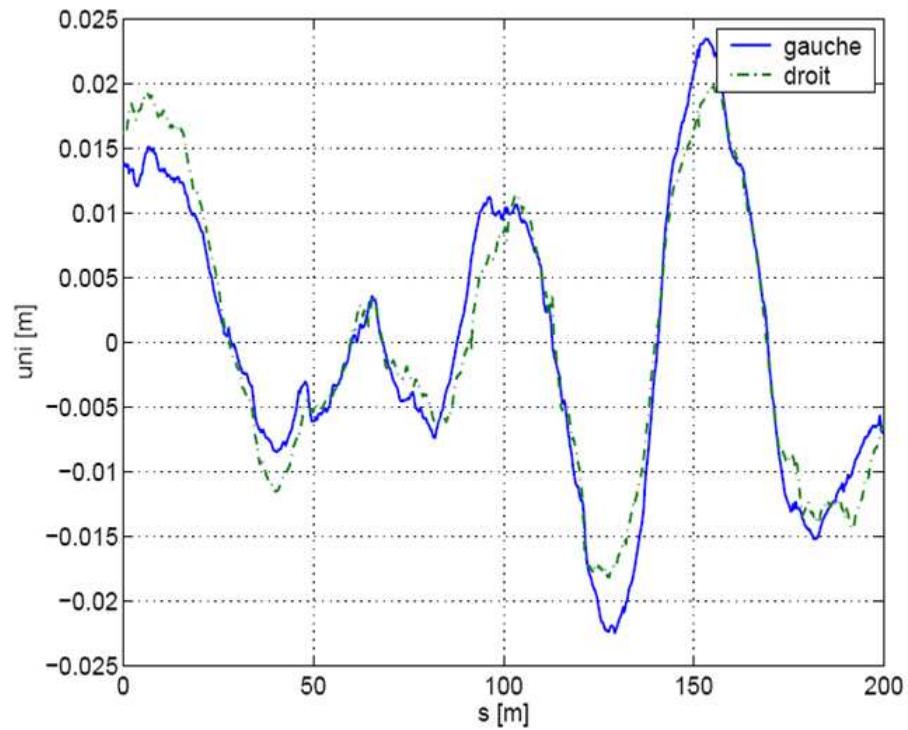


FIG. 3.4 – Exemple d’uni de chaussée : RN 10 - Trappes (78)

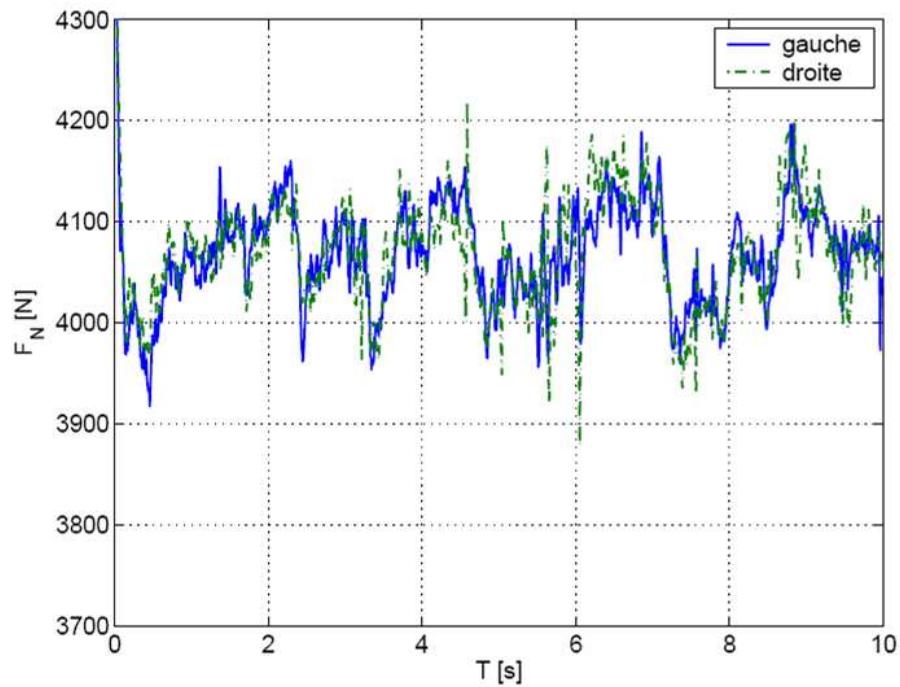


FIG. 3.5 – Variations de la force normale dues à l’uni

- Véhicules types "4X4" : 2.20 m.
- Camping-car : 2.30 m.

Les marges de sécurité latérales doivent tenir compte des vitesses pratiquées sur l'itinéraire et de ce fait, des valeurs de 3.00 à 3.50 m sont usuellement retenues pour les routes principales. Le standard international se situe à 3.50 m [SET06]. En fonction des contraintes de topographie et des restrictions sur le trafic poids lourd, des largeurs inférieures peuvent être adoptées.

3.6 Conclusions

Les calculs effectués précédemment le sont pour des vitesses bien définies. Néanmoins, les vitesses pratiquées par les conducteurs sont bien au dessus de ces vitesses de conception. Pour prendre en compte ce phénomène, les limites de vitesse sur ces infrastructures sont supérieures, elles sont données dans le tableau 3.6

TAB. 3.6 – Vitesses limites en fonction du type de la route

Type	R60	R80 ou T80	T100	L80	L100	L120
Limitation de vitesse (km/h)	90	90/110	90/110	90/110	110/130	110

Les simplifications le plus souvent apportées aux représentations de la route concernent les dévers, la pente et l'uni de la route.

Pour le dévers, l'hypothèse simplificatrice utilisée est qu'il reprend une partie des forces de contact au moyen du report de la masse du véhicule. Ainsi, le dévers facilite la prise de virage, et le sous-estimer revient à se placer dans un cas plus difficile. Cette hypothèse n'est pas valide dans le cas des dévers inversés.

La pente influe sur la dynamique du véhicule au niveau de la répartition des charges, de la dynamique verticale et des liaisons de celle-ci avec les autres modes. Or, ces derniers sont peu représentés dans la plupart des modèles, d'où la non prise en compte de ce phénomène.

Finalement, l'uni intervient principalement sur la dynamique verticale du véhicule et sur ses couplages avec les autres modes. Tout comme pour la pente, ces modes ne sont pas ou sont peu représentés dans la littérature.

Nous pourrions apporter une pondération à ces instructions. En effet, dans des cadres bien particuliers, elles ne peuvent être respectées. Par exemple dans les zones urbaines où les coûts d'acquisition des terrains sont très importants, mais aussi, dans les zones de montagne où la topologie du terrain ne permet que certains tracés, les courbures de certains virages sont bien plus élevées que les celles des valeurs limites.

Troisième partie

Observateurs pour l'Estimation des Variables d'état du Véhicule et les Attributs de la Route et Reconstruction 3D de la Chaussée

4

Observabilité et observateurs : État de l'art

Sommaire

4.1	Stabilité des systèmes dynamiques : Stabilité de Lyapunov	72
4.2	Observateurs d'état	74
4.2.1	Définition d'un observateur	74
4.2.2	Observabilité d'un système dynamique	75
4.2.3	Observateurs pour les systèmes linéaires	78
4.2.4	Observateurs pour les systèmes non-linéaires	78
4.2.5	Filtre de Kalman standard et Kalman étendu	79
4.2.6	Observateur proportionnel intégral à entrées inconnues	80
4.2.7	Observateurs en cascade	84
4.3	Conclusion	87

L'observabilité d'un processus est un concept très important en automatique. En effet, la connaissance de l'état à chaque instant est nécessaire à la réalisation de nombreux objectifs tels que la commande, le diagnostic, la détection de défaillances de capteurs, etc. L'état d'un système est un ensemble minimum de variables permettant de décrire son évolution. La mesure en ligne de ces variables est souvent très coûteuse ou parfois impossible pour des raisons techniques. Pour pallier cette difficulté, on fait appel à des algorithmes d'estimation en ligne de ces variables non mesurées (observateurs ou encore capteurs logiciels). Ces algorithmes reposent sur un modèle de connaissance et un certain nombre de mesures issues de capteurs physiques. Le modèle est formé d'équations dynamiques décrivant le procédé. Le principe est le suivant : Le procédé étant modélisé comme un système dynamique soumis à l'action de grandeurs externes (entrées) faisant varier un ensemble de grandeurs mesurées (sorties), l'observateur consiste en un système dynamique auxiliaire dont le vecteur d'entrées est constitué du vecteur d'entrée et de sorties du système dynamique (procédé), et le vecteur de sortie est l'état estimé (état interne du procédé).

Le but d'un observateur est donc de fournir, avec une convergence garantie, une estimation de la valeur courante de l'état en fonction des entrées et des sorties présentes et passées : $u([0, t])$, $y([0, t])$. Cette estimation doit être obtenue en temps réel. L'observateur revêt usuellement la forme d'un système dynamique.

Le but de ce chapitre est de présenter, d'une part, quelques rappels indispensables et nécessaires à la compréhension des développements de ce mémoire et, d'autre part, un état de l'art sur l'observabilité des systèmes linéaires et non-linéaires et les différentes méthodes de construction d'observateurs et d'estimateurs. Nous porterons une attention toute particulière au célèbre Filtre de Kalman Étendu (EKF) et à l'observateur de Luenberger dans version simple et étendu. Dans de nombreux cas pratiques, ces observateurs donnent des résultats très satisfaisants.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans la section 4.1, on donne quelques définitions de stabilité notamment selon Lyapunov. Les définitions des propriétés d'observabilité pour les systèmes linéaires et non-linéaires ainsi que la synthèse de quelques observateurs tels que le filtre de Kalman standard et étendu (4.2.5) et l'observateur proportionnel intégral à entrées inconnues (4.2.6) sont abordés dans la section 4.2. Une approche pour la synthèse d'observateurs en cascade et les conditions nécessaires pour assurer sa stabilité sont décrites dans la section 4.2.7. La section 4.3 dresse quelques conclusions.

4.1 Stabilité des systèmes dynamiques : Stabilité de Lyapunov

La stabilité au sens de Lyapunov est une théorie générale valable pour toute équation différentielle. Cette notion signifie que la solution d'une équation différentielle initialisée au voisinage d'un point d'équilibre en reste suffisamment proche.

Soit la classe des systèmes non-linéaires décrits par l'équation dynamique suivante :

$$\dot{x} = f(x, t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (4.1)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ et $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ fonction continue. Nous désignons par x_e un point d'équilibre de (4.1) tel que $f(x_e, t) = 0, \forall t \geq t_0$, et par $x(t, t_0, x_0)$ la solution à l'instant $t \geq t_0$ du système (4.1) initialisé en x_0 à l'instant t_0 . Dans notre étude, on suppose que ce point d'équilibre x_e est unique. Ceci nous ramène à présenter les définitions de la stabilité du système (4.1) autour de l'origine.

Définition de stabilité : *L'origine x_e est un point d'équilibre stable au sens de Lyapunov pour le système (4.1) si $\forall \epsilon > 0, \forall t_0 \geq 0$, il existe un scalaire positif $\delta(\epsilon, t_0)$ tel que :*

$$\|x_0\| < \delta(\epsilon, t_0) \Rightarrow \|x(t, t_0, x_0)\| < \epsilon, \quad \forall t \geq t_0.$$

On dit que l'origine est instable dans le cas contraire.



Définition de stabilité uniforme : *L'origine x_e est un point uniformément stable pour le système (4.1) si $\forall \epsilon > 0$, il existe un scalaire positif $\delta(\epsilon)$ tel que :*

$$\|x_0\| < \delta(\epsilon) \Rightarrow \|x(t, t_0, x_0)\| < \epsilon, \quad \forall t \geq t_0.$$



Définition de l'attractivité : L'origine x_e est un point d'équilibre attractif pour (4.1) si et seulement s'il existe un scalaire positif $\delta(t_0)$ tel que :

$$\|x_0\| < \delta(t_0) \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} (x(t, t_0, x_0)) = 0, \quad \forall t \geq t_0.$$

Lorsque $\delta(t_0) = +\infty$, on dit que l'origine est globalement attractive. ■

Définition de stabilité asymptotique : L'origine x_e est un point d'équilibre asymptotiquement (resp. globalement asymptotiquement) stable pour le système (4.1) s'il est stable et attractif (resp. globalement attractif). ■

Définition de stabilité exponentielle : L'origine x_e est un point d'équilibre localement exponentiellement stable pour le système (4.1) s'il existe deux constantes α et β telles que :

$$\|x(t, t_0, x_0)\| < \alpha \exp(-\beta(t - t_0)), \quad \forall t \geq t_0, \quad \forall x_0 \in \mathbb{R}_1.$$

Lorsque $\mathbb{R}_1 = \mathbb{R}^n$, on dit que l'origine est globalement exponentiellement stable. ■

Définition d'une fonction propre définie positive : Soit $V(x, t) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \Rightarrow \mathbb{R}^+$ une fonction continue. $V(x, t)$ est dite propre définie positive si :

1. $\forall t \in \mathbb{R}^+, \forall x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0 \quad V(x, t) > 0;$
 2. $\forall t \in \mathbb{R}^+, V(x, t) = 0 \Rightarrow x = 0;$
 3. $\forall t \in \mathbb{R}^+ \lim_{\|x\| \rightarrow \infty} V(x, t) = \infty.$
-

Définition de fonction de Lyapunov : Une fonction $V(x, t)$ de classe C^1 est une fonction de Lyapunov locale (resp. globale) au sens large pour le système (4.1) si elle est définie positive et s'il existe un voisinage de l'origine V_0 tel que $\forall x \in V_0$ (resp. $x \in \mathbb{R}^n$) :

$$\dot{V}(x, t) = \frac{\partial(V(x, t))}{\partial t} + (\partial(V(x, t)) \partial t) f(x(t), t) \leq 0.$$

Si $\dot{V}(x, t) < 0$, alors $V(x, t)$ est appelée fonction de Lyapunov au sens strict pour (4.1). ■

Théorème 4.1 : Si le système (4.1) admet une fonction de Lyapunov locale au sens large (resp. au sens strict) alors l'origine est un point d'équilibre localement stable (resp. asymptotiquement stable). ■

Théorème 4.2 : L'origine du système (4.1) est localement exponentiellement stable s'il existe des constantes $\alpha, \beta, \gamma > 0$, $p \geq 0$ et une fonction $V(x, t) : V_0 \times \mathbb{R}^+ \Rightarrow \mathbb{R}^+$ de classe C^1 telles que, $\forall x \in V_0$:

1. $\alpha \|x\|^p \leq V(x, t) \leq \beta \|x\|^p$;
2. $\dot{V}(x, t) < \gamma V(x, t)$.

Si $V_0 = \mathbb{R}^n$, alors l'origine de (4.1) est globalement exponentiellement stable.

■

Remarque : En choisissant la fonction de Lyapunov quadratique $V(x, t) = x^T P_o x$, $P_o = P_o^T > 0$, le système linéaire $\dot{x}(t) = A_o x(t)$ est globalement exponentiellement stable à l'origine si et seulement si P_o est la solution de l'équation $A_o^T P_o + P_o A_o = -Q_o$, pour une matrice Q_o définie positive.

4.2 Observateurs d'état

Dans cette section, en premier lieu, on donne une définition détaillée des observateurs pour les systèmes linéaire et non-linéaire et, en second lieu, nous présentons quelques notions d'observabilité.

4.2.1 Définition d'un observateur

On appelle observateur (ou reconstruteur d'état) d'un système dynamique S :

$$S : \begin{cases} x(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (4.2)$$

un système dynamique auxiliaire O dont les entrées sont constituées les vecteurs d'entrée et de sortie du système à observer et dont le vecteur de sortie $\hat{x}(t)$ est l'état estimé :

$$O : \begin{cases} \dot{z}(t) = \hat{f}(x(t), u(t), y(t)) \\ \hat{x}(t) = \hat{h}(x(t), u(t), y(t)) \end{cases} \quad (4.3)$$

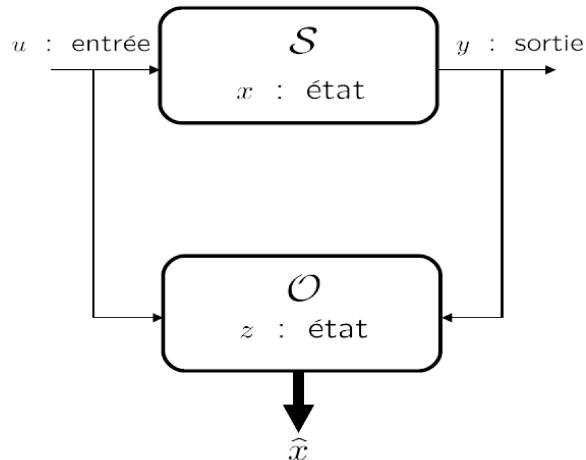


FIG. 4.1 – Principe d'estimation d'état

$z \in \mathbb{R}^s$, est un observateur asymptotique local pour le système (S) si les deux conditions suivantes sont vérifiées :

1. $x(0) = \hat{x}(0) \Rightarrow x(t) = \hat{x}(t) \forall t \geq 0$;
2. il existe un voisinage ouvert $\Omega \in \mathbb{R}^n$ de l'origine tel que :

$$x(0) - \hat{x}(0) \in \Omega \Rightarrow \|x(t) - \hat{x}(t)\| \rightarrow 0 \text{ quand } t \rightarrow +\infty$$

Si $\|x(t) - \hat{x}(t)\|$ tend exponentiellement vers zéro, le système (O) est dit observateur exponentiel de (S).

Lorsque $\Omega = \mathbb{R}^n$, le système (O) est dit observateur global de (S).

La condition 2 signifie que l'erreur d'estimation doit être asymptotiquement stable. Un système pour lequel un observateur de la forme (4.3) existe et tel que la condition 2 soit satisfaite est dit détectable.

Quant à la condition 1, elle signifie que si l'observateur (O) et le système (S) possèdent tous les deux le même état initial, alors l'état estimé de (O) devrait être égal à l'état réel du système (S) à tout instant.

4.2.2 Observabilité d'un système dynamique

Une question cruciale qui se pose lors de l'élaboration d'un observateur pour un système est bien sûr de savoir s'il est possible d'en estimer l'état, ou autrement dit, s'il est observable à partir des informations antérieures sur l'entrée et la sortie. L'étude de l'observabilité du système apporte une solution à ce problème. A la différence des systèmes linéaires, l'observabilité des systèmes non-linéaires est intrinsèquement liée aux entrées et aux conditions initiales. Lorsqu'un système non-linéaire est observable, il se peut qu'il possède des entrées qui le rendent inobservable (entrées singulières qui annihilent toute stratégie d'observation) [Aub99].

La valeur initiale de l'état d'un système est en général, inconnue. On peut alors se poser la question : sous quelles conditions l'état du système peut-il être déterminé à partir des sorties et des entrées ? Ce problème est appelé problème d'observabilité.

Observabilité des systèmes non-linéaires

Dans cette partie on se limite aux observateurs non-linéaires à gain non réduit. L'observabilité d'un système est la propriété qui permet de dire si l'état peut être déterminé uniquement à partir de la connaissance des signaux d'entrée et de sortie. Dans le cas des systèmes non-linéaires, la notion d'observabilité est liée aux entrées et aux conditions initiales. Dans cette section, une définition plus précise de d'observabilité sera donnée dans le cas des systèmes à temps continu de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{cases} \quad (4.4)$$

avec $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ et $h : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$.

Définition d'Indistinguabilité : Soient $y_0(t), t \geq 0$ et $y_1(t), t \geq 0$ deux signaux de sortie générés par l'application du signal d'entrée $u(t), t \geq 0$ au système (4.4) avec les conditions initiales x_0 et x_1 respectivement. On dit que x_0 et x_1 sont indistinguables si

$$y_0(t) = y_1(t), \forall t \geq 0, \text{ pour toute entrée } u.$$

Dans le cas contraire, on dit que x_0 et x_1 sont distinguables.



Définition d'Observabilité : Le système (4.4) est dit observable en x_0 si x_0 est distinguable de tout $x \in \Re^n$. En outre, le système (4.4) est observable si $\forall x_0 \in \Re^n, x_0$ est distinguable.

■

Si nous supposons que u et y sont connus, les dérivées de u et y peuvent être évaluées. Dans ce cas, le concept d'observabilité peut être interprété de manière claire. Pour un système SISO (single-input single-output), nous définissons

$$y' = [y \ \dot{y} \ \ddot{y} \ \dots \ y^{(n-1)}]^T.$$

et

$$u' = [u \ \dot{u} \ \ddot{u} \ \dots \ u^{(n-1)}]^T.$$

Chaque dérivée $y^{(i)}$ est une fonction de x et u , \dot{u} , \ddot{u} , \dots , $u^{(n-1)}$, et donc aussi une fonction de x et u' si $i \leq n - 1$. Soit ζ_i une fonction définie par :

$$y^{(i)} = \zeta_i(x, u').$$

La dérivée de $y^{(i)}$ est donnée par :

$$y^{(i+1)} = \left[\frac{\partial \zeta_i(x, u')}{\partial x} \right] f(x, u) + \left[\frac{\partial \zeta_i(x, u')}{\partial u'} \right] \frac{du'}{dt}$$

ce qui est, par définition, $\zeta_{i+1}(x, u')$ si $i + 1 \leq n - 1$. En définissant l'opérateur linéaire Υ_f par :

$$(\Upsilon_f \zeta)(x, u') = \left[\frac{\partial \zeta_i(x, u')}{\partial x} \right] f(x, u) + \left[\frac{\partial \zeta_i(x, u')}{\partial u'} \right] \frac{du'}{dt}$$

alors y' s'écrit :

$$y' = \pi(x, u'),$$

où

$$\pi(x, u') = \begin{bmatrix} h(x, u') \\ (\Upsilon_f h)(x, u') \\ \vdots \\ (\Upsilon_f^{(n-1)} h)(x, u') \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

est la matrice d'observabilité.

Si la matrice d'observabilité (4.5) est inversible, i.e : il existe π^{-1} telle que

$$x = \pi^{-1}(y', u')$$

alors le système correspondant est observable. En outre, si la jacobienne de la matrice d'observabilité,

$$\Gamma(x, u') = \frac{\partial \pi(x, u')}{\partial x},$$

est inversible en x_0 , alors il existe un voisinage ν_{x_0} de x_0 sur lequel π est inversible. Dans ce cas, le système correspondant est localement observable, ce qui signifie que x_0 est distinguable de tous les points de ν_{x_0} .

Pour les systèmes multi-sorties, c'est-a-dire $y \in \mathbb{R}^p, p > 1$, la notion d'observabilité peut être investiguée d'une manière similaire.

Soit :

$$N = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_p]^T$$

un vecteur d'entiers positifs, avec $\sum_{i=1}^{i=p} n_i = n$. Définissons :

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_p]^T,$$

et

$$h(x, u) = [h_1(x, u) \ h_2(x, u) \ \dots \ h_p(x, u)]^T$$

En posant

$$\pi_j(x, u') = \begin{bmatrix} h_j(x, u') \\ (\Upsilon_f h_j)(x, u') \\ \vdots \\ (\Upsilon_f^{(n-1)} h_j)(x, u') \end{bmatrix},$$

les dérivées de y_j jusqu'à l'ordre n_j sont

$$[y_j \ \dot{y}_j \ \dots \ y_j^{(n_j)}]^T = \pi_j(x, u').$$

La matrice d'observabilité pour les systèmes multi-sorties est alors définie par :

$$\pi_N(x, u') = \begin{bmatrix} \pi_1(x, u') \\ \pi_2(x, u') \\ \vdots \\ \pi_q(x, u') \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

S'il existe N tel que la matrice $\pi_N(x, u')$ soit inversible, alors l'état x peut être déterminé à partir de u', y et les dérivées de chaque y_j jusqu'à l'ordre n_j . De ce fait, le système correspondant est observable.

Remarques : Dans le domaine non-linéaire, il existe plusieurs façons de définir la notion d'observabilité. En lien avec le concept d'indistinguabilité des états, une définition très fréquente a été établie dans [Zem07]. Des résultats importants ont été établis dans [Nij90] pour une classe spéciale de systèmes affines en la commande. Pour plus de détails sur les différents types de définitions sur l'observabilité des systèmes non-linéaires, nous renvoyons le lecteur à [Ber02, Nij82, Nij90].

Le concept d'observabilité cité précédemment peut être étendu directement à la classe des systèmes à temps discret. Différents types de définitions ont été abordés dans [Nij82].

Observabilité des systèmes linéaires

On considère un système linéaire invariant dans le temps. La commande $u \in \mathbb{R}^p$, l'état $x \in \mathbb{R}^n$ et des sorties mesurées $y \in \mathbb{R}^q$.

Le système est décrit de la manière suivante

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, & x(0) = x_0 \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (4.7)$$

A, B, C et D sont des matrices, constantes de taille appropriée.

Définition 4.1 : Le système décrit par l'équation (4.7) est dit observable, ou la paire (C, A) est dite observable, si pour tout instant t_1 , l'état initial x_0 peut être déterminé à partir de l'entrée u et de la sortie y dans l'intervalle $[0, t_1]$. Connaissant x_0 , on peut déterminer $x, \forall t > t_0$.

■

Autrement dit, si on connaît les entrées et les sorties du système sur un intervalle de temps fini, alors, on peut déduire l'état initial du système.

Théorème 4.3 : Le système(4.7) est observable si et seulement si la matrice d'observabilité $O = [C^T \ (CA)^T \ (CA^2)^T \ \dots \ (CA^{n-1})^T]^T$ est de rang maximal.

Les propriétés suivantes sont équivalentes

- Le système décrit par l'équation (4.7) ou la paire (C, A) est observable.
- La matrice d'observabilité $O = [C^T \ (CA)^T \ (CA^2)^T \ \dots \ (CA^{n-1})^T]^T$ est de rang maximal.
- La matrice $\begin{bmatrix} A - \lambda I_n \\ C \end{bmatrix}$ est de rang maximal pour tout $\lambda \in \mathbf{C}$

En utilisant ce théorème, on peut montrer que l'état x du système peut se déduire de la sortie y et de l'entrée u en dérivant un certain nombre de fois une combinaison linéaire de ces deux variables [Hie04]. Ce moyen théorique permet de résoudre le problème de l'estimation de l'état à condition que les signaux y et u ne soient pas bruités. Dans le cas où ces deux signaux sont accompagnés de bruits, des étapes de lissage sont nécessaires avant toute opération de dérivation.

4.2.3 Observateurs pour les systèmes linéaires

Pour les systèmes linéaires, l'observabilité ne dépend pas de l'entrée appliquée $u(t)$. En conséquence, si un système est observable pour l'entrée nulle ($u(t) = 0, \forall t \geq 0$), alors il est observable pour toute entrée. Pour ce cas bien particulier, il existe des algorithmes parfaitement établis, dits estimateurs ou observateurs de type Kalman, Luenberger. Ce type d'estimateurs s'applique aux systèmes linéaires observables entièrement, ou observables partiellement mais tels que tous les pôles de la partie inobservable soient stables. On dit alors que le système est détectable. Dans un cadre déterministe, le choix du gain (qui règle la dynamique de l'observateur par retour de sortie) n'est pas unique. En pratique, le choix se fait en fonction de la vitesse de convergence désirée. Par contre, dans un cadre stochastique, où l'on suppose que la dynamique du système et les mesures sont affectées par des bruits centrés, dont on connaît les statistiques, il existe un gain optimal unique qui minimise la variance de l'erreur d'estimation. L'estimateur ainsi obtenu porte le nom de *filtre de Kalman*.

4.2.4 Observateurs pour les systèmes non-linéaires

Dans le cas des systèmes non-linéaires, l'observation d'état est un peu plus délicate, il n'existe pas de solution générale. Une des difficultés théoriques de la synthèse d'observateurs est due à l'existence d'entrées rendant le système inobservable, qui est un phénomène typique des systèmes non-linéaires. Les premières solutions théoriques proposées pour ce type de systèmes consistaient souvent à se ramener d'une façon ou d'une autre aux systèmes linéaires et à appliquer des estimateurs de type Kalman-Luenberger [Zem07]. Plus précisément, il s'agit de :

1. *Méthodes de transformations non-linéaires* : Cette technique fait appel à un changement de coordonnées afin de transformer un système non-linéaire en un système linéaire. Une fois qu'une telle transformation réalisée, l'utilisation d'un observateur de type Luenberger

suffira pour estimer l'état du système transformé, et donc l'état du système original en utilisant le changement de coordonnées inverse.

2. *Observateurs étendus* : Dans ce cas, le calcul du gain de l'observateur se fait à partir du modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement. C'est par exemple le cas du filtre de Kalman étendu et de l'observateur de Luenberger étendu.
3. *Observateurs à grand gain* : Ce type d'observateurs est utilisé en général pour les systèmes lipschitziens. Son nom est dû au fait que le gain de l'observateur est suffisamment grand, dans le but de compenser la non-linéarité du système.

4.2.5 Filtre de Kalman standard et Kalman étendu

D'une manière générale, le problème du filtrage consiste à déterminer des estimateurs de variables du système lorsque l'environnement présente des perturbations aléatoires. Deux points de vue peuvent être utilisés pour aborder cette question : celui de Wiener qui utilise une approche fréquentielle et celui de Kalman qui utilise l'approche temporelle. Dans tous les cas, le but est de déterminer le filtre optimal au sens de la minimisation de la variance d'erreur entre la variable réelle et son estimation (nous ne regarderons ici que la deuxième approche).

Le filtre de Kalman est un reconstructeur d'état dans un environnement stochastique. Lorsque les variances des bruits sont connues, c'est un estimateur linéaire minimisant la variance de l'erreur d'estimation. Les algorithmes donnant la solution de ce problème ont été déterminés initialement par [Kal60].

Le filtre de Kalman étendu fait partie des techniques d'estimation les plus populaires, il est largement utilisé pour l'estimation d'état des systèmes dynamiques non-linéaires. Ce filtre étendu consiste à appliquer les équations du filtre de Kalman standard au modèle non-linéaire linéarisé par la formule de Taylor au premier ordre.

Équations du filtre de Kalman standard

Considérons le système discret linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_k &= A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\ y_k &= C_kx_k + v_k \end{cases} \quad (4.8)$$

où w_k et v_k sont respectivement le vecteur des bruits de processus et de mesure.

Les équations du filtre s'obtiennent par un algorithme récursif qui se déroule en deux étapes : une étape de prédiction et une étape de correction.

La première étape consiste en la prédiction des variables d'état et de la matrice de variance. Notons respectivement $x_{k|k-1}$ et $P_{k|k-1}$ le vecteur d'état et la matrice de variance prédicts à l'instant $k - 1$.

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k-1} &= A_{k-1}x_{k-1|k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \\ P_{k|k-1} &= A_{k-1}P_{k-1|k-1}A_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{cases}$$

où Q_k est la matrice de variance/covariance des bruits de processus.

La mise à jour des estimations se fait à chaque période d'échantillonnage, elle consiste à corriger l'estimée de l'état et de la variance, lorsque une nouvelle mesure est disponible.

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - C_k\hat{x}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} &= (I - K_kC_k)P_{k|k-1} \end{cases}$$

La matrice K_k est appelée *gain de Kalman* ou encore *matrice de correction*. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$K_k = P_{k|k-1}C_k^T(C_kP_{k|k-1}C_k^T + R_k)^{-1}$$

R_k est la matrice variance/covariance des bruits de mesure.

Remarque : En fonction de l'importance de la variance de l'erreur du bruit de mesure par rapport à la variance de l'état, le filtre de Kalman va accorder plus d'importance, au modèle ou à la mesure.

Filtre de Kalman étendu

Dans le cas où la fonction d'évolution $f(x_k, u_k, w_k)$ et/ou la fonction des mesures $g(x_k, v_k)$ ne sont pas linéaires, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \\ y_k = g(x_k, v_k) \end{cases} \quad (4.9)$$

Les bruits w_k et v_k sont toujours considérés indépendants l'un de l'autre, blancs et gaussiens centrés. Le filtre de Kalman linéaire développé précédemment n'est plus applicable, la méthode la plus simple pour résoudre le problème d'estimation d'état, est de linéariser les fonctions non-linéaires. Cette linéarisation se fait par le développement en série de Taylor de ces fonctions non-linéaires autour de l'état estimé. Ce procédure rend alors applicable les équations du filtre de Kalman standard pour les systèmes linéaires.

Remarque : L'EKF a été appliqué avec succès sur différents types de procédés non-linéaires. Malheureusement, les preuves de stabilité et de convergence établies dans le cas des systèmes linéaires, ne peuvent être étendues de manière générale au cas des systèmes non-linéaires. Dans un environnement déterministe, une preuve de la convergence du filtre de Kalman étendu a été établie dans [Bou97, Bou99] pour la classe des systèmes non-linéaires à temps discret. Cependant, cette convergence n'est que locale. L'analyse de la convergence de cet estimateur reste, à l'heure actuelle, un problème ouvert [Che93, Gre93]

4.2.6 Observateur proportionnel intégral à entrées inconnues

Dans cette partie, l'utilisation des observateurs de type proportionnel intégral (PI) est étendue aux systèmes singuliers à entrées inconnues dans le but d'estimer l'état et les défauts en présence de perturbations. L'idée d'inclure une boucle supplémentaire comportant un intégrateur dans la structure de l'observateur est apparue par analogie entre contrôle et observation. L'observateur PI a été présenté dans [Woj78] pour les systèmes mono-variables non singuliers puis généralisé aux systèmes multivariables usuels dans [Sha85]. Koenig et Mammar dans [Koe02] ont généralisé l'usage de cet observateur en proposant de l'appliquer aux systèmes singuliers.

Objectif

L'objectif de l'utilisation de l'observateur proportionnel intégral est de pouvoir estimer non seulement l'état d'un système singulier, mais aussi les fautes qui l'affectent. Les fautes peuvent apparaître sur les entrées ou les sorties. L'estimation de l'état et des fautes reste efficace dans le cas où le système a également des entrées inconnues (signaux de perturbation, erreurs de modélisation, etc.). La synthèse de l'observateur, effectuée selon des techniques issues de la commande H_∞ , permet de minimiser et de borner a priori l'influence des entrées inconnues sur l'erreur d'estimation [Mar03].

Synthèse de l'observateur PI à entrées inconnues

Structure et conditions d'existance de l'observateur : Soit le système linéaire invariant dans le temps suivant :

$$\begin{cases} \underline{E}\dot{x}(t) = \underline{A}x(t) + \underline{B}u(t) + \underline{E}_1w(t) + \underline{R}_1f(t) \\ y(t) = \underline{C}x(t) + \underline{D}u(t) + \underline{R}_2f(t) \end{cases} \quad (4.10)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $f(t) \in \mathbb{R}^{nf}$ le vecteur des défauts, $w(t) \in \mathbb{R}^{nw}$ les entrées inconnues, $u(t) \in \mathbb{R}^{nu}$ le vecteur de commande et $y(t) \in \mathbb{R}^m$ les sorties.

Les matrices \underline{E} et $\underline{A} \in \mathbb{R}^{l*n}$ ne sont pas nécessairement carrées, les autres matrices sont de dimensions compatibles avec celles de \underline{E} et des vecteurs définis ci-dessus. L'observateur PI a entrées inconnues donné par le système (4.11) est proposé pour estimer les états du modèle ainsi que les défauts.

$$\begin{cases} \dot{z} = Fz + (L_1 + L_2)y + Ju + H\hat{f} \\ \dot{f} = L_3(y - \hat{y}) \\ \hat{x} = M_1z + M_2y + M_3u \\ \hat{y} = C\hat{x} + Du + K\hat{f} \end{cases} \quad (4.11)$$

Le schéma bloc de simulation de l'observateur proportionnel intégral à entrées inconnues est visible sur la Fig. 4.2.

Remarque : La particularité de cette structure par rapport à un observateur de type Luenberger classique est la présence d'une boucle intégrale. L'ajout d'intégrateurs permet d'estimer correctement les défaillances caractérisées par des signaux en basses fréquences.

L'existence de l'observateur impose les trois hypothèses suivantes [Hie04, Koe05] :

- rang $[\underline{E} \ \underline{E}_1] = \text{rang}(\underline{E})$.
- $(\underline{E}, \underline{A}, \underline{C})$ est imp-observable.
- $\hat{f}(t) = 0$.

La première hypothèse implique que l'espace image de la matrice de distribution des entrées inconnues est inclus dans celui de \underline{E} , autrement dit les entrées inconnues agissent sur la partie dynamique de système.

La deuxième hypothèse est une hypothèse classique dans le cadre des systèmes singuliers, elle est nécessaire à l'observation des termes impulsifs. Dans le cas où le système ne présente pas de terme impulsif, cette hypothèse est évidemment vérifiée.

La troisième hypothèse signifie que l'on considère des défauts constants, où à dynamiques très

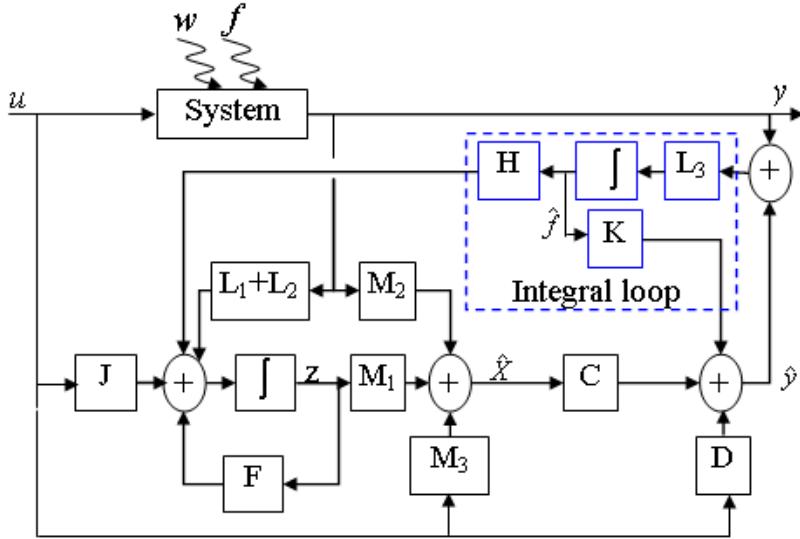


FIG. 4.2 – Schéma bloc de simulation de l'observateur proportionnel intégral

lentes. Dans le cas où cette considération n'est pas vérifiée, des approches multi-intégrateurs existent [Koe03, Koe05].

Afin de pouvoir exprimer les erreurs d'estimation sous la forme d'un système dynamique usuel, on introduit une matrice $P \in \mathbb{R}^{l \times l}$ qui assure la compression des lignes de \underline{E} . Cette dernière propriété est nécessaire pour pouvoir exprimer l'erreur d'estimation sous la forme d'un système dynamique usuel [Hie04, Koe05]. On définit alors un nouveau système par :

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_1w(t) + R_1f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + R_2f(t) \end{cases} \quad (4.12)$$

avec $E \in \mathbb{R}^{nr \times n}$ est de plein rang ligne. Les autres matrices, sont de dimensions compatibles avec E et les différents signaux :

$$\begin{aligned} P\underline{E} &= \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} & P\underline{A} &= \begin{bmatrix} A \\ A_b \end{bmatrix} & P\underline{B} &= \begin{bmatrix} B \\ B_b \end{bmatrix} \\ P\underline{R}_1 &= \begin{bmatrix} R_1 \\ R_{1b} \end{bmatrix} & P\underline{E}_1 &= \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= \begin{bmatrix} -B_b u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} & C &= \begin{bmatrix} A_b \\ C \\ R_{1b} \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} 0 \\ D \end{bmatrix} & R_2 &= \begin{bmatrix} R_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Une fois les conditions d'existence de l'observateur vérifiées, il reste à déterminer les paramètres de celui-ci. Ils sont tous définis par rapport à L_2 et L_3 , autrement dit par \bar{L} donnée par

$$\bar{L} = \begin{bmatrix} L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}$$

Gain de l'observateur PI

La dynamique des erreurs d'observation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_f \end{bmatrix} = [\bar{A} - \bar{L}\bar{C}] \begin{bmatrix} e_x \\ e_f \end{bmatrix} + \bar{B}w$$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_f \end{bmatrix} = \bar{D} \begin{bmatrix} e_x \\ e_f \end{bmatrix}$$
(4.15)

où \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , et \bar{D} sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} T_1 A & T_1 R_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \bar{B} &= \begin{bmatrix} T_1 E_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \bar{C} &= [C \quad R_2] & \bar{D} &= \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & I_{nf} \end{bmatrix} \end{aligned}$$
(4.16)

et T_1 et T_2 sont données par :

$$\begin{cases} T_1 = (E^T E + C^T C)^{-1} E^T \\ T_2 = (E^T E + C^T C)^{-1} C^T \end{cases}$$
(4.17)

Le théorème ci-dessous propose de déterminer le gain \bar{L} minimisant la norme H_∞ du transfert des perturbations w sur les erreurs d'estimations $e_x = x - \hat{x}$ et $e_f = f - \hat{f}$

L'observateur PI converge si et seulement si le gain $[\bar{A} - \bar{L}\bar{C}]$ est une matrice d'Hurwitz. Il est donc nécessaire de déterminer la matrice \bar{L} qui assure les conditions suivantes [Mar03] :

$$\left\| \bar{D} (sI - (\bar{A} - \bar{L}\bar{C}))^{-1} \bar{B} \right\|_\infty < \gamma$$
(4.18)

avec γ , un réel positif le plus petit possible.

Théorème 4.4 *L'observateur PI optimalement robuste défini par (4.11) pour le système (4.10) est obtenu par minimisation de γ sous les contraintes LMI suivantes, en les variables $\gamma > 0 \in \Re$, $X \in \Re^{(n+n_f) \times (n+n_f)} > 0$ et $Y \in \Re^{(n+n_f) \times (m+n-n_r)}$.*

$$\left\{ \begin{array}{c} \begin{bmatrix} \bar{A}^T X + X \bar{A} - Y \bar{C} - \bar{C}^T Y^T & X \bar{B} & \bar{D}^T \\ \bar{B}^T X & -\gamma I_{n_d} & 0 \\ \bar{D} & 0 & -\gamma I_{n_d+n_f} \end{bmatrix} \prec 0 \\ X \succ 0 \end{array} \right.$$
(4.19)

Pour éviter de synthétiser un observateur qui converge trop lentement vers les états réels, il est possible d'ajouter une contrainte LMI (4.20) qui force la vitesse de convergence en imposant

que les pôles de $\overline{A} - \overline{LC}$ soient dans le demi-plan gauche complexe défini par : $\{z | R_e(z) < -\lambda\}$, et $\lambda > 0$.

$$X(\overline{A} + \lambda I) + (\overline{A} + \lambda I)^T X - Y\overline{C} - \overline{C}^T Y^T \prec 0 \quad (4.20)$$

Cette contrainte revient à imposer que la matrice $\overline{A} - \overline{LC} + \lambda I$ soit stable et donc décaler le spectre $\overline{A} - \overline{LC}$ de λ .

Une fois le problème LMI résolu, la matrice \overline{L} est donnée par :

$$\overline{L} = \begin{bmatrix} L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = X^{-1}Y \quad (4.21)$$

La représentation sous forme d'espace d'état de l'observateur PI possédant pour entrées, la commande u et la sortie y du système équivalent, et comme sorties, les estimées de l'état \hat{x} et des défauts \hat{f} , est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \hat{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & H \\ -L_3 C & -L_3 R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \\ L_3(I_m - CT_2) & L_3(CT_2 - I_m)D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}$$

et

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & I_{n_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_2 & -T_2 D \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{aligned} F &= T_1 A - L_2 C, & L_1 &= FT_2, & J &= T_1 B - (L_1 + L_2)D, \\ H &= T_1 R_1 - L_2 R_2, & M_1 &= I_n, & M_2 &= T_2, & M_3 &= -T_2 D, \\ K &= R_2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.2.7 Observateurs en cascade

Dans l'introduction, nous avons mentionné l'utilisation de plusieurs observateurs placés en cascade. Il est nécessaire d'étudier la convergence de cette structure d'observateurs.

L'idée de la mise en cascade d'observateurs consiste à concevoir un observateur stable pour l'ensemble d'un système à partir de la synthèse séparée d'observateurs pour chacun des sous-systèmes qui le constituent. La Fig.4.3, montre une structure générale d'une structure fondée sur deux observateurs en cascade.

Dans le cas d'observateurs construits comme le montre la Fig.4.3, les estimations obtenues à l'aide du premier observateur affectent la dynamique du second. Nous étudions ici la convergence du système global, dans le cas où les observateurs sont conçus selon les techniques conventionnelles, telles que le filtre de Kalman simple ou linéarisé, Luenberger ou d'autres types d'observateurs linéaires.

Supposons que le premier observateur (O_1) soit conçu pour estimer l'état du premier système (S_1), décrit par :

$$S_1 = \begin{cases} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, u_1) \\ y_1 &= C_1 x_1 \end{cases} \quad (4.23)$$

L'estimateur non-linéaire (O_1) du premier système (S_1) est donné par :

$$O_1 = \begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}_1, u_1) + L_1(\hat{x}_1, u_1)(y_1 - C_1 \hat{x}_1) \\ \hat{y}_1 &= C_1 \hat{x}_1 \end{cases} \quad (4.24)$$

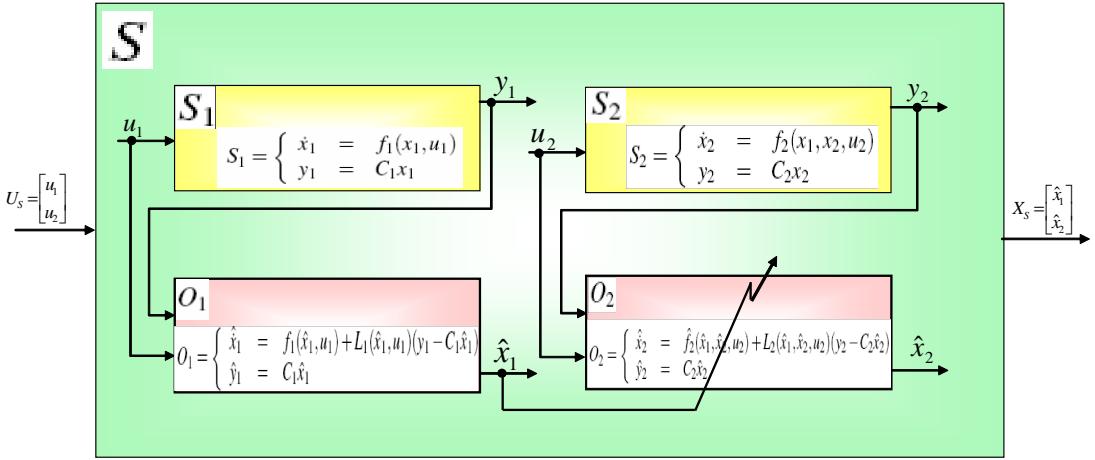


FIG. 4.3 – Observateurs en cascade

où \hat{x}_1 est l'estimation de x_1 et $L_1(\hat{x}_1, u_1)$ est la matrice des gains.

L'erreur d'estimation de l'observateur O_1 est :

$$e_1 = x_1 - \hat{x}_1 = f_1(x_1, u_1) - f_1(\hat{x}_1, u_1) - L_1(\hat{x}_1, u_1)(C_1 x_1 - C_1 \hat{x}_1)$$

En linéarisant les fonctions d'évolution du système S_1 autour de l'état estimé, on obtient :

$$\dot{e}_1 = \left[\frac{\partial f_1(x_1, u_1)}{\partial x_1} - L_1(\hat{x}_1, u_1)C_1 \right] e_1$$

Si le gain, L_1 est choisi selon des techniques de conception d'estimateur, alors l'erreur d'estimation e_1 décroît vers zéro :

$$e_1 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty \quad (4.25)$$

Le deuxième observateur (O_2) est construit pour le deuxième système (S_2), décrit par :

$$S_2 = \begin{cases} \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, u_2) \\ y_2 = C_2 x_2 \end{cases} \quad (4.26)$$

De la même manière, nous allons procéder à la conception du second observateur. Cependant, l'estimée de la fonction f_2 , notée \hat{f}_2 , est employée à la place de f_2 . Elle est calculée en utilisant l'état estimé \hat{x}_1 du système S_1 . En conséquence, le deuxième observateur est construit en utilisant \hat{f}_2 comme suit :

$$O_2 = \begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) + L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)(y_2 - C_2 \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{y}}_2 = C_2 \hat{x}_2 \end{cases} \quad (4.27)$$

Le gain L_2 doit être choisi de telle sorte que la dynamique suivante tend vers zéro :

$$\dot{e}_2 = \left[\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) - C_2 \right] e_2$$

$$e_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty$$

Pour assurer la stabilité du second observateur les deux hypothèses suivantes seront utiles :

Hypothèse 4.1 : $\hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)$ est divisible en une valeur vraie $f_2(x_1, \hat{x}_2 u_2)$ et une erreur Δf_2 , due à l'erreur e_1 .

Δf_2 converge vers 0 lorsque l'erreur e_1 converge vers 0.

$$\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} = \frac{\partial f_2(x_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} + \Delta f_2 \quad (4.28)$$

$$\Delta f_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0 \quad (4.29)$$

Hypothèse 4.2 : On suppose que l'état x_2 est borné, c'est-à-dire :

$$\|x_2\| < x_{2_{max}}$$

L'erreur d'estimation du système S_2 est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \hat{x}_2 - \dot{x}_2 \\ &= f_2(x_1, x_2, u_2) - \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)(y_2 - C_2 \hat{x}_2) \\ &= \frac{\partial f_2(x_1, x_2, u_2)}{\partial x_2} x_2 - \frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial \hat{x}_2} \hat{x}_2 - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) C_2 (x_2 - \hat{x}_2) \\ &= \left[\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) C_2 \right] (x_2 - \hat{x}_2) - \Delta f_2 x_2 \\ \dot{e}_2 &= \left[\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) C_2 \right] e_2 - \Delta f_2 x_2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

D'après la deuxième hypothèse, nous pouvons écrire ce qui suit :

$$\|\Delta f_2 x_2\| \leq \|\Delta f_2\| \|x_2\| \leq \|\Delta f_2\| x_{2_{max}} \quad (4.31)$$

Des équations (4.29) et (4.31), on obtient :

$$\|\Delta f_2 x_2\| \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0$$

Nous avons alors :

$$\Delta f_2 x_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad e_1 \rightarrow 0 \quad (4.32)$$

D'après les équations (4.25) et (4.32), lorsque le temps tend vers l'infini, l'équation (4.30) converge vers la quantité suivante :

$$\dot{e}_2 = \left[\frac{\partial \hat{f}_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)}{\partial x_2} - L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2) C_2 \right] e_2$$

Puisque $L_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, u_2)$ est choisi de telle sorte que la dynamique de l'erreur est stable, alors :

$$e_2 \rightarrow 0 \quad \text{lorsque} \quad t \rightarrow \infty$$

Ce qui prouve la convergence du deuxième observateur (O_2). On conclut que l'ensemble des deux observateurs O_1 et O_2 constitue un observateur stable pour le système global S .

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attelés dans un premier temps à donner quelques rappels sur des concepts relatifs à la stabilité (stabilité au sens de Lyapunov) et à l'observabilité (rappels sur quelques définitions sur la notion d'observabilité et formulation du principe d'estimation d'état pour les classes de systèmes linéaires et non-linéaires). Dans un deuxième temps, nous avons abordé les méthodes de conception d'observateurs pour les systèmes dynamiques linéaires et non-linéaires dans les domaines discret et continu. La troisième partie de ce chapitre a été consacrée à la synthèse d'observateurs en cascade ainsi qu'à une démonstration de la stabilité et de la convergence de ces derniers sous certaines conditions. Ces différentes notions seront utilisées comme bases théoriques des chapitres qui suivent.

5

Observateurs pour l'estimation des variables d'état du véhicule et les attributs de la route

Sommaire

5.1	Estimation des variables d'état du véhicule et de la pente de la route	91
5.1.1	Résultats des estimations	93
5.1.2	Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la variation du rayon de pneu	96
5.2	Estimation du dévers de la route et du roulis du véhicule	97
5.2.1	Adaptation du système pour la conception de l'observateur	99
5.2.2	Résultats des estimations	100
5.2.3	Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la vitesse du véhicule	101
5.3	Estimation des mouvements de la caisse	101
5.3.1	Estimation de tangage et de pompage	104
5.4	Observateur PI pour l'estimation de la courbure	109
5.4.1	Adaptation du système pour la conception de l'observateur	110
5.4.2	Résultats des estimations	110
5.4.3	Robustesse de l'observateur vis-à-vis des variations de la vitesse du véhicule	112
5.5	Conclusions	112

Ce chapitre présente une méthodologie d'estimation des différents paramètres de la géométrie de la route (pente, dévers et courbure), par un ensemble d'observateurs placés en cascade. Le premier avantage de cette structure d'observation est que le temps de calcul s'en trouve réduit. Ce facteur joue un rôle très important, notamment pour l'implantation temps réel des observateurs. Le deuxième avantage est que la synthèse des observateurs est plus aisée. En effet, pour concevoir des observateurs, on est obligé de faire des opérations mathématiques très complexes, comme le

calcul des dérivées ordinaires et partielles, le calcul de matrices jacobienes, les changements de repères, des produits vectorielles... Ces différentes opérations sont très difficiles à réaliser, même avec des logiciels très puissants lorsque le système présente des fortes non-linéarités et un nombre important de variables. Un autre avantage de ce choix d'observateurs en cascade est la facilité de changer et d'éliminer un observateur sans modifier la structure globale.

De nombreux travaux ont traité de la reconstruction de la géométrie de la route [Bra95, Auf00a, Auf00b, Bro95, Lab03, Lab05] en utilisant la vision artificielle (systèmes de visions mono-caméra ou à plusieurs caméras -stéréovision- embarqués sur le véhicule). La détection des bords de voie de circulation, l'estimation de sa géométrie et la localisation du véhicule sont des points essentiels dans ce contexte. Ces travaux ont montré de nombreuses limites, il est par exemple impossible de faire une distinction entre le freinage et la montée de la route, ou encore il est impossible de calculer, avec une précision donnée, la distance à un obstacle dans le cas d'une route non plane. En effet, la perception de l'environnement à l'avant du véhicule par des capteurs embarqués est liée aux variations de la position et de l'inclinaison de ces capteurs, donc aux mouvements du véhicule (pompage, tangage et roulis) et à la géométrie de la route. Il est donc évident qu'avant de percevoir à l'avant du véhicule, il faut bien estimer ses différents mouvements du véhicule et la géométrie de la route au niveau du centre de gravité.

Une méthode d'estimation de la pente de la route à bas coût, par l'application de l'observateur de Luenberger sur le modèle longitudinal du véhicule, est décrite dans la section 5.1. Cette méthode nécessite les données des forces de contact pneumatiques/chaussée. Pour des raisons de coût, ces forces sont très difficilement mesurables, il est ainsi quasiment impossible d'équiper les véhicules standards par des capteurs pour la mesure de ces forces. Pour pallier cette difficulté, un filtre de Kalman étendu (EKF) est développé dans la première partie de la section 5.1.

Un estimateur du dévers de la route et de l'angle de roulis est présenté dans la section 5.2. Cet estimateur est obtenu par application de l'observateur proportionnel intégral (PI) à entrées inconnues sur le modèle bicyclette du véhicule à quatre variables d'état. Il est placé en cascade avec l'EKF.

Dans la section 5.3, on décrit la méthode de reconstruction des mouvements de la caisse du véhicule (tangage et pompage), par une approche multi-modèles, multi-observateurs. Cette approche est choisie afin d'assurer la stabilité et la convergence de l'observateur pour toutes entrées et conditions initiales du système.

La section 5.4 est dédiée à l'estimation de la courbure de la route par application de l'observateur PI sur le modèle bicyclette augmenté à cinq variables d'état. On termine le chapitre par quelques conclusions sur les reconstructions des variables d'état du véhicule et des attributs de la route (section 5.5).

5.1. Estimation des variables d'état du véhicule et de la pente de la route

La structure globale de la méthode d'estimation est schématisée sur la Fig 5.1.

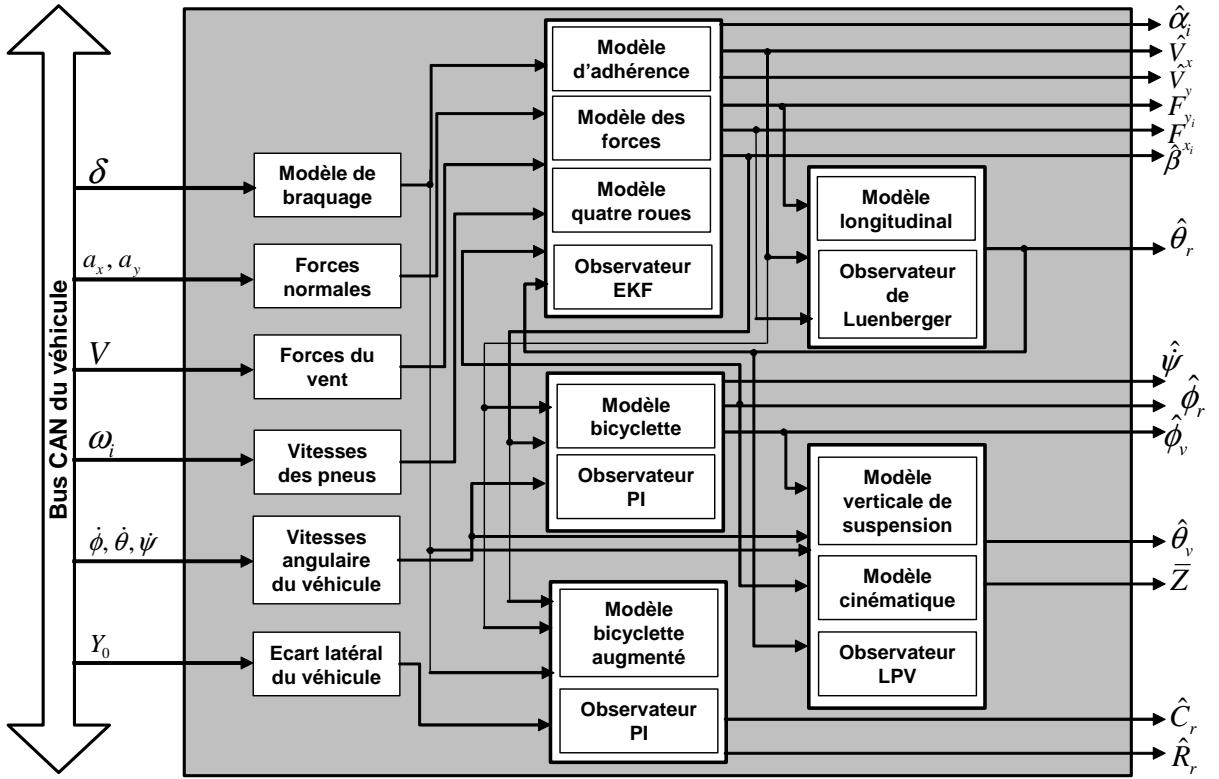


FIG. 5.1 – Structure globale de la méthode d'estimation.

5.1 Estimation des variables d'état du véhicule et de la pente de la route

La mise en œuvre d'une structure d'observation, pour estimer les états du véhicule et la pente de la route, nécessite de disposer d'un modèle dynamique du véhicule. Le modèle le plus en accord avec l'étude demandée est le modèle non-linéaire à quatre roues données par le système 5.1.

$$\begin{cases} m\dot{V}_x &= \sum F_{X_i} + m\dot{\psi}V_y - C_x V_x^2 - mg \sin \theta_r \\ m\dot{V}_y &= \sum F_{Y_i} - m\dot{\psi}V_x - C_y V_y^2 \\ I_z \ddot{\psi} &= \sum M_{Z_i} \end{cases} \quad (5.1)$$

Comme le système étudié est non-linéaire, nous ferons appel à au filtrage de Kalman étendu [Nou02, Kal60]. Nous rappelons que le filtre de Kalman étendu (EKF) consiste à linéariser la fonction d'évolution $f(x_k, u_k, w_k)$, et la fonction des mesures $g(x_k, u_k, v_k)$ du processus autour de l'estimation courante de l'état pour se positionner dans le cadre du filtre de Kalman standard. Ce dernier donnera une estimation optimale récursive des états à partir de la mesure de quelques variables (dans notre cas la fonction $g(x, u, t)$ est linéaire).

Le schéma bloc de l'estimation est représenté sur la Fig. 5.2. Le vecteur de sortie du système est constitué de la vitesse longitudinale du véhicule et de la vitesse de lacet. La vitesse longitu-

dinale est approchée ici par la moyenne des vitesses de translation des deux roues arrière : ces deux roues étant celles qui sont les moins sujettes aux glissements longitudinaux. Le vecteur de mesures y_{nl} , et la matrice de sortie du système C_{nl} sont donc donnés par :

$$C_{nl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad y_{nl} = C_{nl}x. \quad (5.2)$$

avec $x = [V_x \ V_y \ \dot{\psi}]$, où V_x , V_y et $\dot{\psi}$ sont respectivement la vitesse longitudinale, la vitesse latérale et la vitesse de lacet du véhicule.

Le vecteur des entrées u est constitué du braquage des pneumatiques avant (δ) et des vitesses angulaires des quatre pneumatiques (ω_i , $i = 1, \dots, 4$).

$$u = [\delta \ \omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]$$

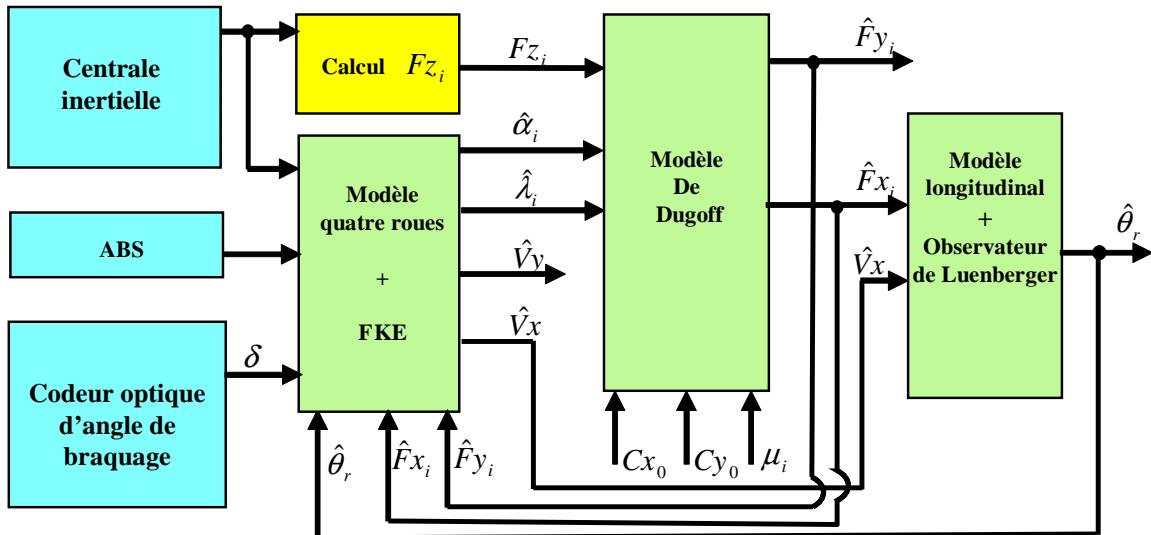


FIG. 5.2 – Schéma bloc des simulations.

La Fig. 5.2 montre qu'à partir des données du système ABS, d'un codeur d'angle de braquage, d'un capteur inertiel et par application de l'EKF sur le modèle discret non-linéaire à quatre roues, on estime les variables d'état du véhicule et les forces de contact pneumatiques/chaussée, qui seront ensuite utilisées comme entrées du modèle longitudinal. Par application de l'observateur de Luenberger sur le modèle longitudinal, on estime la pente de la route.

Remarque : Toutes les entrées de l'observateur ci-dessus peuvent être obtenues à partir des capteurs des deux systèmes ABS et ESP. Notons que la plupart des voitures neuves sont équipées de ces deux systèmes, donc aucun capteur supplémentaire n'est nécessaire au fonctionnement de l'observateur.

L'estimation va procéder en deux étapes. Un premier observateur de type filtre de Kalman étendu (EKF) sera développé pour estimer les états dynamiques du véhicule et les efforts de contact pneumatiques/chaussée. On utilise pour cela le modèle discret non-linéaire (5.3), issu du modèle global du véhicule présenté dans le chapitre de modélisation (chapitre 2). On note ΔT

le pas d'échantillonnage du modèle discrétré. Les équations de ce modèle discret sont données par :

$$\begin{cases} V_x(k+1) = V_x(k) + \frac{\Delta T}{m} \left(\sum F_{X_i}(k) + m\dot{\psi}(k)V_y(k) - C_x V_x^2(k) - mg \sin \theta_r(k) \right) \\ V_y(k+1) = V_y(k) + \frac{\Delta T}{m} \left(\sum F_{Y_i}(k) - m\dot{\psi}(k)V_x(k) - C_y V_y^2(k) \right) \\ \dot{\psi}(k+1) = \dot{\psi}(k) + \frac{\Delta T}{m} (\sum M_{Z_i}(k)) \end{cases} \quad (5.3)$$

Les estimées des forces sont maintenant utilisées comme des entrées du modèle longitudinal simplifié représenté par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \frac{F_{res}}{m} - g \sin \theta_r \\ \dot{\theta}_r = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

avec

$$F_{res} = \sum F_{X_i} + m\dot{\psi}V_y - C_x V_x^2$$

En général la pente de la route est inférieure à dix degrés en valeur absolue, l'approximation de $\sin \theta_r$ par θ_r est donc acceptable. De ce fait, le système (5.4) peut s'écrire sous la forme linéaire suivante :

$$\dot{\underline{x}}_l = \underline{A}_l \underline{x}_l + \underline{B}_l \underline{u}_l$$

avec, $\underline{x}_l = [V_x \ \theta_r]^T$ le vecteur d'état, $\underline{u}_l = F_{res}$ l'entrée, et $\underline{C}_l = [1 \ 0]$ est la matrice des sorties. Les deux matrices \underline{A}_l et \underline{B}_l sont données par :

$$\underline{A}_l = \begin{bmatrix} 0 & -g \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{B}_l = \begin{bmatrix} 1/m \\ 0 \end{bmatrix}$$

Remarque : Les deux hypothèses nécessaires à la stabilité des observateurs en cascade (voir le chapitre sur l'observabilité et observateurs (chapitre 4)), donc du système global schématisé sur la Fig. 5.2, sont bien vérifiées, puisque les deux variables (V_x et θ_r) qui constituent le vecteur d'état \underline{x}_l du second modèle (modèle longitudinal) sont bornées. De plus, la fonction d'évolution (\underline{A}_l) de ce modèle est linéaire, donc $\Delta \underline{A}_l = 0, \forall (\underline{x}_l, \underline{u}_l)$.

Pour estimer la pente, on applique l'observateur de Luenberger [Lue71] sur le modèle longitudinal du véhicule. L'expression mathématique de cet observateur est donnée par :

$$\hat{\underline{x}}_l = \underline{A}_l \underline{x}_l + \underline{B}_l \underline{u}_l + L_l (\underline{y}_l - \underline{C}_l \hat{\underline{x}}_l)$$

où L_l est le gain de l'observateur. Il est déterminé de telle sorte que les valeurs propres de la matrice $[\underline{A}_l - L_l \underline{C}_l]$ soient à parties réelles négatives, c'est-à-dire que l'observateur soit stable et que la dynamique de l'observateur est suffisamment rapide devant celle du système.

5.1.1 Résultats des estimations

Dans cette section, les résultats d'estimation des variables d'état du modèle non-linéaire du véhicule et la reconstruction de la pente de la route sont présentés. L'angle de braquage (δ) appliqué aux roues avant est représenté sur la Fig.5.3-a, le braquage des roues arrière est supposé

nul. La pente de référence est visible sur la Fig.5.9-a (trait continu), les vitesses de rotation des quatre roues sont représentées sur les Fig.5.3-b, Fig.5.3-c, Fig.5.3-d et Fig. 5.3-e. Dans cette partie de simulation, les coefficients d'adhérence (μ_i) sont supposés constants et fixés à 0.8. Rappelons que la vitesse du véhicule est remplacée par la moyenne des vitesses de translation des deux roues arrières. Elle est fixée aux alentours de 25m/s.

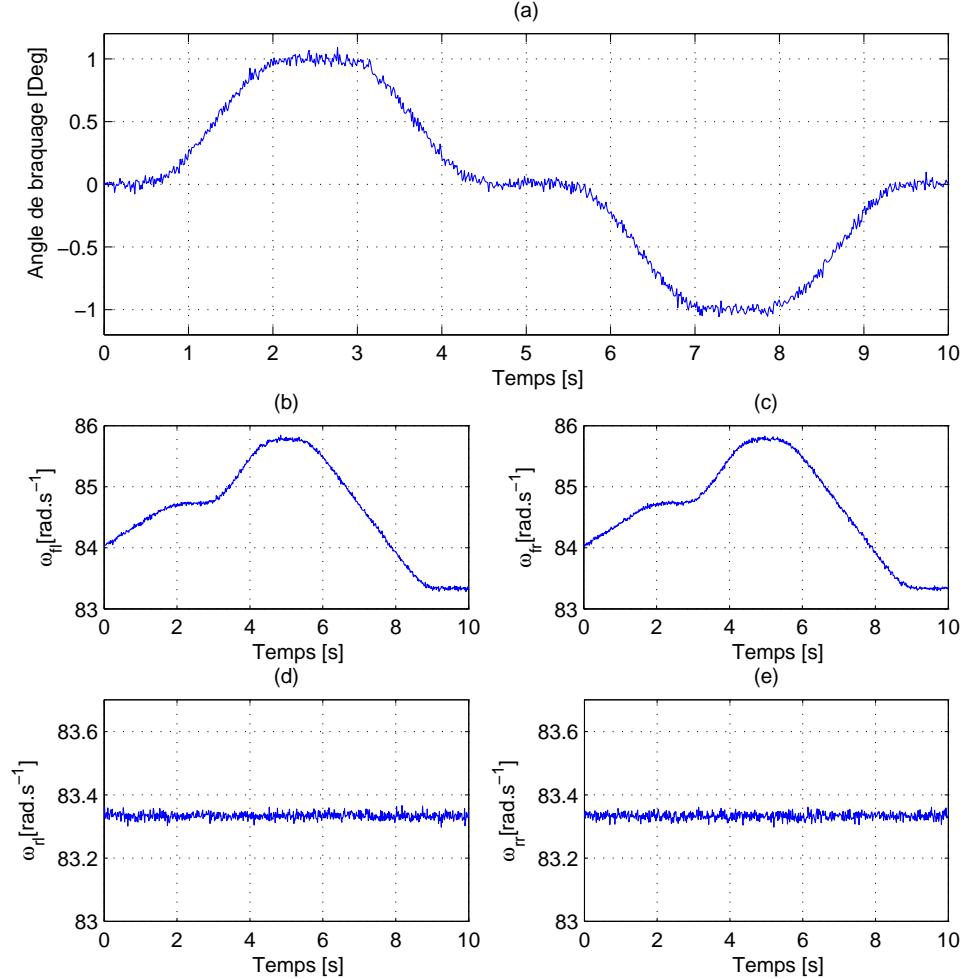


FIG. 5.3 – Braquage et vitesses angulaires des quatre roues

Le véhicule est considéré initialement sur une ligne droite. A l'instant $t = 1s$, le véhicule aborde une portion de clothoïde positive, il se déplace par la suite sur une portion d'arc de cercle à l'instant $t = 2s$, avant de reprendre une clothoïde de courbure opposée à $t = 3s$ qui le ramène sur une ligne droite à $t = 4s$. A $t = 5s$ le véhicule reprend la trajectoire inverse. La route est supposée avoir une pente positive, entre $t = 0$ et $t = 4,5s$ elle passe de 2 à 7 degrés, puis elle reste constante pendant une seconde, elle décroît à zéro degré à l'instant $t = 9s$. Le scénario choisi correspond à un changement de voie ou un double virage gauche sur une route avec pente positive.

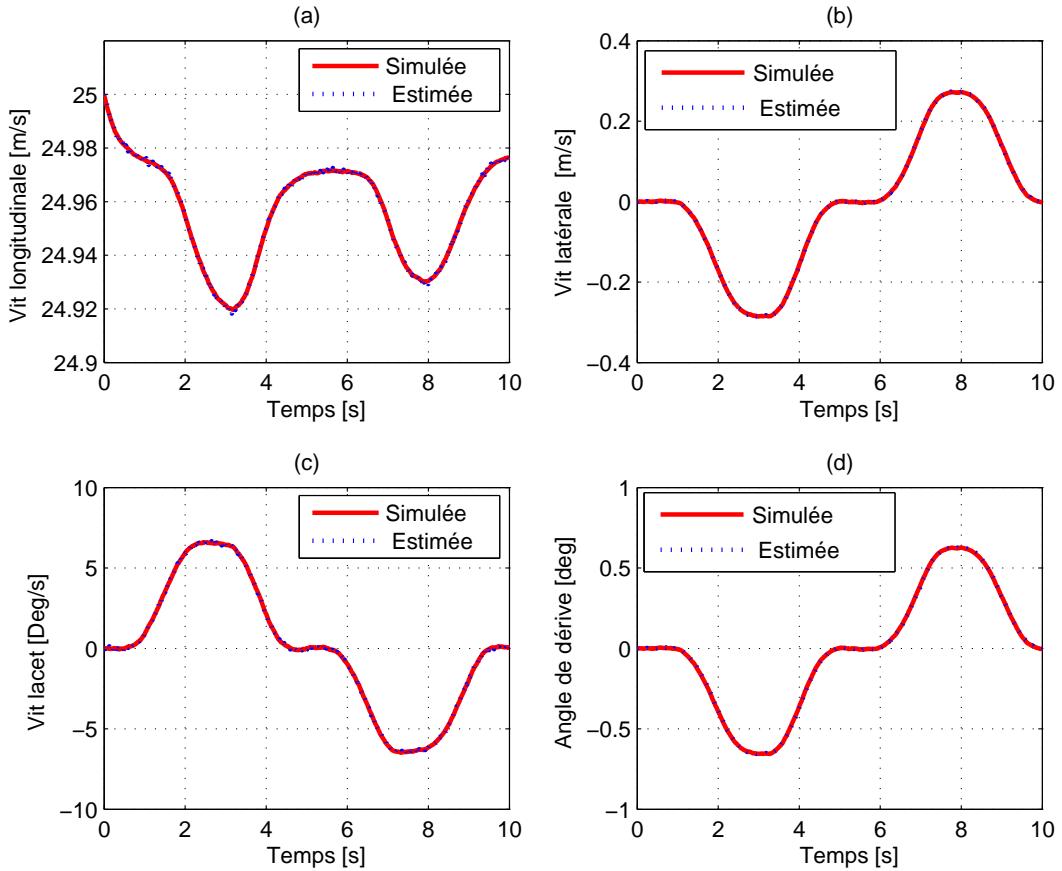


FIG. 5.4 – Résultat d'estimation et de simulation des variables d'état

Paramètres de l'observateur : Le temps d'échantillonnage des variables du filtre (entrées et sorties mesurées) est fixé à 0.01s (100Hz). Les erreurs des capteurs sont fixées selon les données de constructeurs comme suit : $\sqrt{\sigma_\delta^2} = 0,001\text{rad}$, $\sqrt{\sigma_{\omega_i}^2} = 0,01\text{rad.s}^{-1}$, $\sqrt{\sigma_\psi^2} = 0.01\text{rad.s}^{-1}$. Pour la vitesse longitudinale, vu qu'on utilise la moyenne des vitesses de translation des roues arrière, la variance de l'erreur de cette variable est choisi suffisamment grand afin de compenser les erreurs de modélisation comme les glissements longitudinaux dans le cas de freinage du véhicule, $\sqrt{\sigma_{V_x}^2} = 0,25\text{ms}^{-1}$. L'observabilité du système (5.3) est bien vérifiée pour toute vitesse longitudinale non nulle du véhicule, la démonstration est donnée dans l'annexe A.

La Fig. 5.4 montre les résultats d'estimation pour la vitesse longitudinale (a), la vitesse latérale (b), la vitesse de lacet (c) et l'angle de dérive (d). Les courbes obtenues, tout comme les erreurs d'estimation présentées sur la Fig. 5.5, permettent de conclure que ces variables sont parfaitement estimées.

Les résultats d'estimation des forces longitudinales sont visibles sur la Fig. 5.6.

La figure 5.7 montre les forces latérales du pneu avant gauche (a), pneu avant droit (b), pneu arrière gauche (c) et de pneu arrière droit (d), obtenues par les tests d'estimation, et celles données par le modèle non-linéaire. On observe que les résultats obtenus sont très proches.

La figure 5.8 représente les résultats de simulation des forces normales, les courbes obtenues

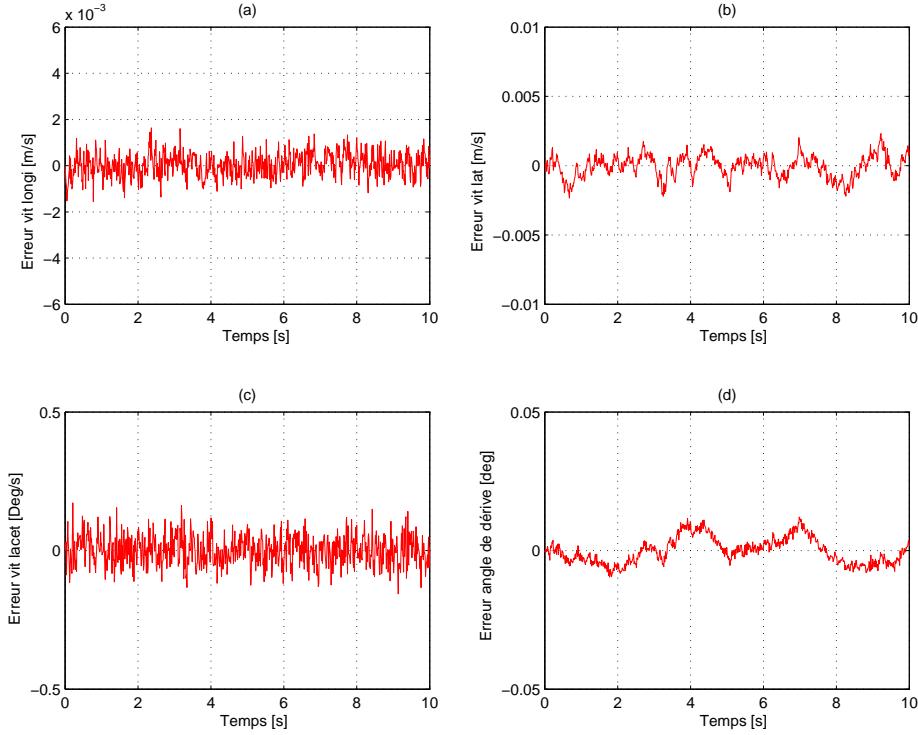


FIG. 5.5 – Erreurs d'estimation des variables d'état

montrent que le transfert de charge est proportionnel à l'accélération latérale du véhicule. Plus cette accélération est grande, plus le transfert est important. Ce résultat est facilement démontrable par les équations du modèle. Les simulations ont montré que lors d'un passage d'une ligne droite à un cercle de courbure $C_r = 0.008m^{-1}$ avec une vitesse de $20m/s$, le transfert est de $2800N$ environ, par contre le transfert est de $580N$ à une vitesse de $10m/s$ (le poids du véhicule est supposé fixe à $m = 1500kg$), donc plus la vitesse dans un virage est grande, plus l'accélération est grande, plus le transfert est important.

La pente estimée par l'observateur de Luenberger (OL) est visible sur la Fig. 5.9-a. Les erreurs d'estimation sont représentées sur Fig. 5.9-b. Ces deux courbes montrent aussi la bonne estimation de cette variable. Malgré des fortes dynamiques (double virage à une vitesse de $90km/h$) et une très forte variation de la pente de la route, l'observateur suit fidèlement les simulations avec une erreur très acceptable.

Le tableau B.3 montre les erreurs d'estimation des variables d'état. En moyenne, ces erreurs sont inférieures à 3% et en valeur maximale inférieure à 7%.

5.1.2 Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la variation du rayon de pneu

Dans ces travaux nous nous sommes limités au rayon statique du pneu. Comme nous l'avons signalé dans le chapitre de modélisation, le rayon dynamique varie par rapport au rayon sous charge d'environ 1%. Afin de s'assurer que cela n'influe pas sur l'estimation de la pente, des tests de robustesse sont réalisés vis-à-vis de ces variations, le résultat obtenu est visible sur la figure 5.10. Il est concluant. En effet, pour une variation du rayon de pneu de $28 cm$ à $32 cm$, la

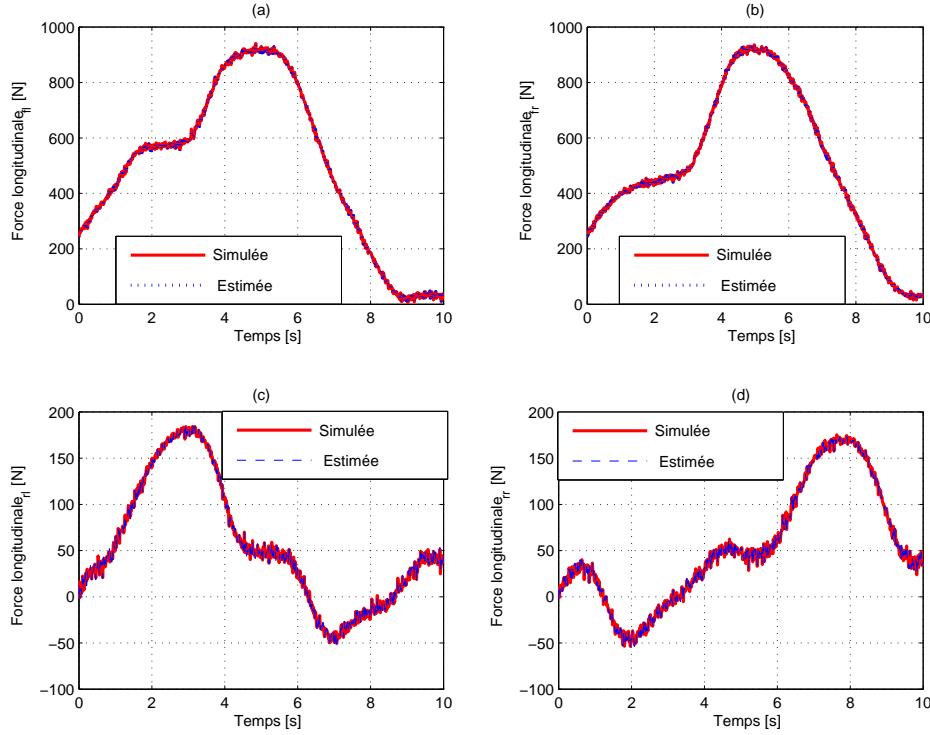


FIG. 5.6 – Forces longitudinales estimées et simulées

courbe de la pente estimée est presque constante.

5.2 Estimation du devers de la route et du roulis du véhicule

On développe, dans cette section, un estimateur du dévers de la route et du roulis du véhicule par application de l'observateur proportionnel intégral à entrées inconnues [Koe03, Koe05, Mar04, Mam06a, Seb08b] sur le modèle bicyclette à quatre variables d'état donné par l'équation (5.5) (voir chapitre de modélisation du véhicule pour plus de détails sur ce modèle). Le modèle est sujet à plusieurs entrées inconnues et des défauts de modélisation (forces de vent, dévers de la route...).

On illustre dans cette section uniquement la partie simulation, la partie expérimentation est donnée dans le chapitre 7.

L'observateur proposé donne une estimation robuste et fidèle de l'état du système [Mar04, Koe02]. La présence d'une boucle intégrale dans la structure de l'observateur permet à la fois d'estimer l'état du véhicule et les défauts du système [Koe05]. Les fautes peuvent apparaître en entrée comme sur les sorties. L'estimation reste efficace dans les cas où le système a également des entrées inconnues (signaux de perturbation, erreurs de modélisation, etc.).

La synthèse de l'observateur, effectuée selon des techniques issues de la commande H_∞ [Koe05, Mar04] permet de minimiser et de borner a priori l'influence des entrées inconnues sur l'erreur d'estimation. La présence de contraintes LMI assure la stabilité et la convergence très rapide de l'observateur vers les valeurs réelles.

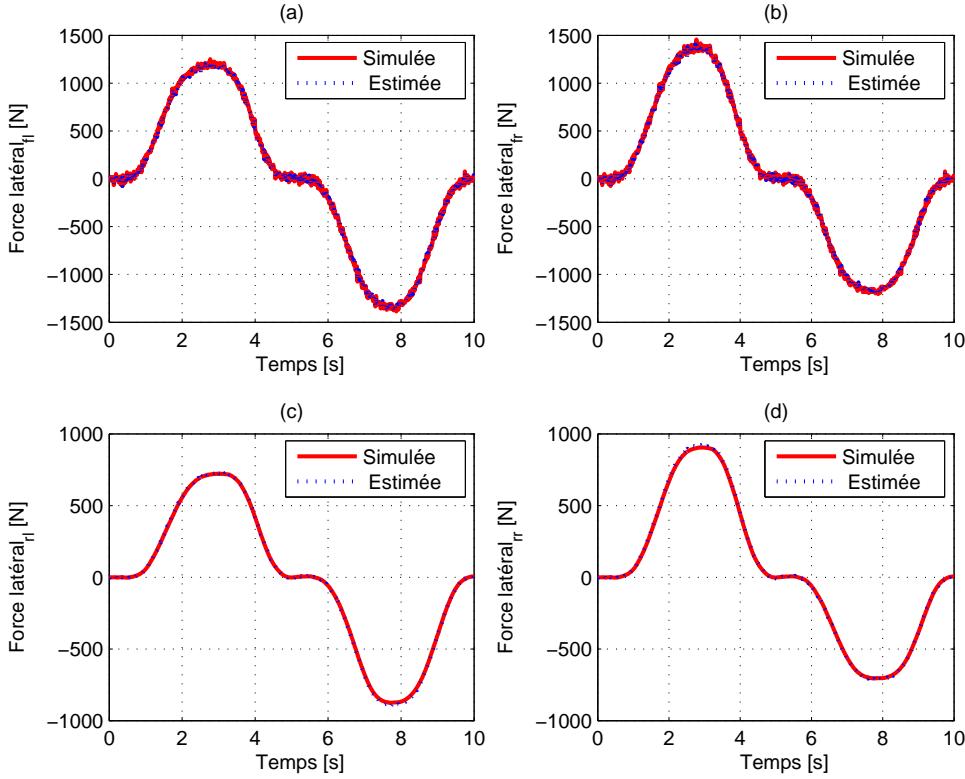


FIG. 5.7 – Forces latérales estimées et simulées

Soit le modèle bicyclette linéaire du véhicule donné par :

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u} + \bar{B}_{w1}\phi_r + \bar{B}_{w2}f_g \quad (5.5)$$

avec

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{I_e C_0}{I_x m v} & -1 - \frac{I_e C_1}{I_x m v^2} & \frac{h_r(mgh_r - k_r)}{I_x v} & -\frac{h_r l_r}{I_x v} \\ -\frac{C_1}{I_z} & -\frac{C_2}{I_z v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{C_0 h_r}{I_x} & -\frac{C_1 h_r}{I_x v} & \frac{mgh_r - k_r}{I_x} & -\frac{b_r}{I_x} \end{bmatrix} \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} \frac{I_e C_{sf}}{I_x m v} \\ \frac{l_f C_{sf}}{I_z} \\ 0 \\ \frac{C_{sf}}{I_x} \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{w1} = \begin{bmatrix} -\frac{g}{v} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{w2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m v} \\ \frac{l_g}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Les variables d'état de ce modèle sont :

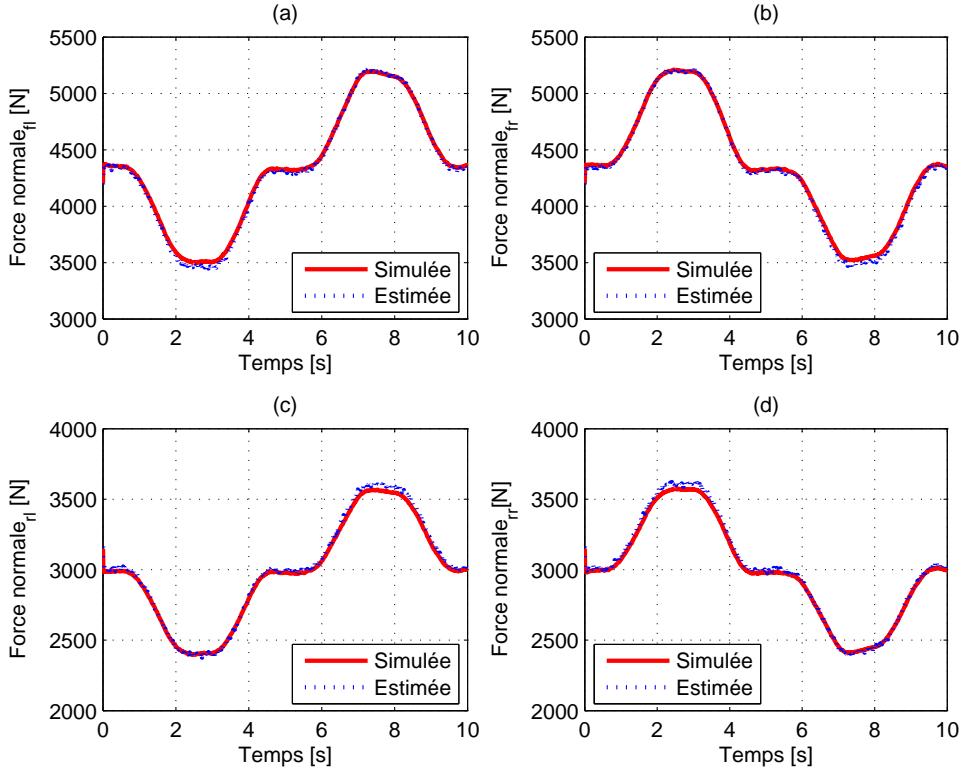


FIG. 5.8 – Forces normales estimées et simulées

$$\bar{x} = [\beta \quad \dot{\psi} \quad \phi_v \quad \dot{\phi}_v]^T$$

et son vecteur d'entrée est constitué d'une entrée connue (angle de braquage) et de deux entrées inconnues (forces de vent latérale f_g et l'angle de dévers ϕ_r).

5.2.1 Adaptation du système pour la conception de l'observateur

L'observateur PI donné dans le chapitre 4 par le système (4.11) est appliqué au modèle du véhicule donné par l'équation (5.5) afin de synthétiser un observateur PI à entrées inconnues. Le modèle développé ci-dessus peut donc être facilement adapté. La force du vent est considérée comme une entrée inconnue, tandis que l'angle du dévers de la route est considéré comme un signal d'erreur. Du point de vue de l'observateur PI, trois mesures sont disponibles : l'angle de dérive latérale du véhicule, estimé par le filtre de Kalman étendu (EKF), la vitesse de lacet et la vitesse de roulis du véhicule. Le vecteur des mesures \bar{y} et la matrice des sorties \bar{C} sont donc donnés par :

$$\bar{y} = [\beta \quad \dot{\psi} \quad \dot{\phi}_v]^T, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

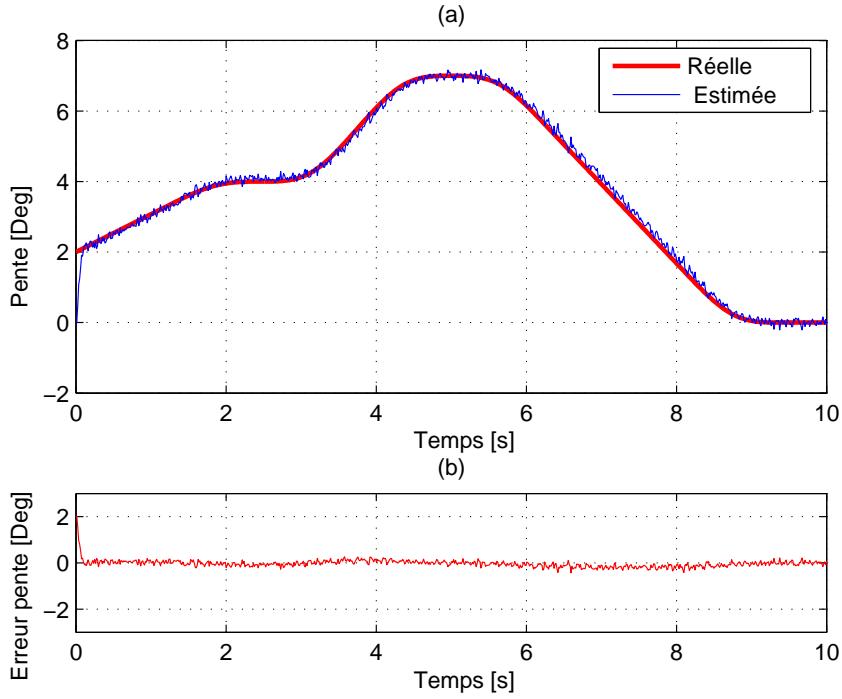


FIG. 5.9 – La pente estimée et l'erreur d'estimation

TAB. 5.1 – Erreurs d'estimation : moyenne et maximale

ϵ	$\frac{moy(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{moy(\epsilon_{V_x})}{max(V_x)}$	$\frac{moy(\epsilon_{V_y})}{max(V_y)}$	$\frac{moy(\epsilon_{\beta})}{max(\beta)}$	$\frac{moy(\epsilon_{F_x})}{max(F_x)}$	$\frac{moy(\epsilon_{F_y})}{max(F_y)}$	$\frac{moy(\epsilon_{\theta_r})}{max(\theta_r)}$
$\epsilon(\%)$	0.312	0.122	0.013	0.141	2.910	1.957	1.629
ϵ	$\frac{max(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{max(\epsilon_{V_x})}{max(V_x)}$	$\frac{max(\epsilon_{V_y})}{max(V_y)}$	$\frac{max(\epsilon_{\beta})}{max(\beta)}$	$\frac{max(\epsilon_{F_x})}{max(F_x)}$	$\frac{max(\epsilon_{F_y})}{max(F_y)}$	$\frac{max(\epsilon_{\theta_r})}{max(\theta_r)}$
$\epsilon(\%)$	3.31	0.76	1.25	2.85	6.86	5.36	4.71

5.2.2 Résultats des estimations

Cette partie présente les résultats de simulation des variables d'état du modèle linéaire du véhicule et le résultat de reconstruction du dévers de la route.

L'angle de braquage appliqué au modèle, le dévers de la route sont respectivement visibles sur les figures 5.11 et Fig. 5.14-a. Dans cette partie, la vitesse du véhicule est maintenue au voisinage de $25m/s$ ($90km/h$). Des bruits blancs gaussiens d'écart type de 5% sont volontairement ajoutés sur toutes les variables d'entrée et de sortie mesurées du modèle.

La figure 5.12 représente l'angle de dérive (a), la vitesse de lacet (b), le roulis du véhicule (c) et la vitesse de roulis (d). Les erreurs d'estimation sont présentées sur la Fig. 5.13. On peut constater que ces erreurs sont très faibles ainsi que le temps de convergence de l'observateur. Toutes les erreurs d'estimation sont inférieures à 5.5% même dans le pire des cas (erreur maximale). L'estimation de l'angle de dévers est visible sur la Fig. 5.14-a comparée avec la référence. L'erreur d'estimation de cet attribut est donnée par la Fig. 5.14-b, elle est de 2.3% en moyenne. Toutes ces figures montrent le bon choix de modèle et de l'observateur.

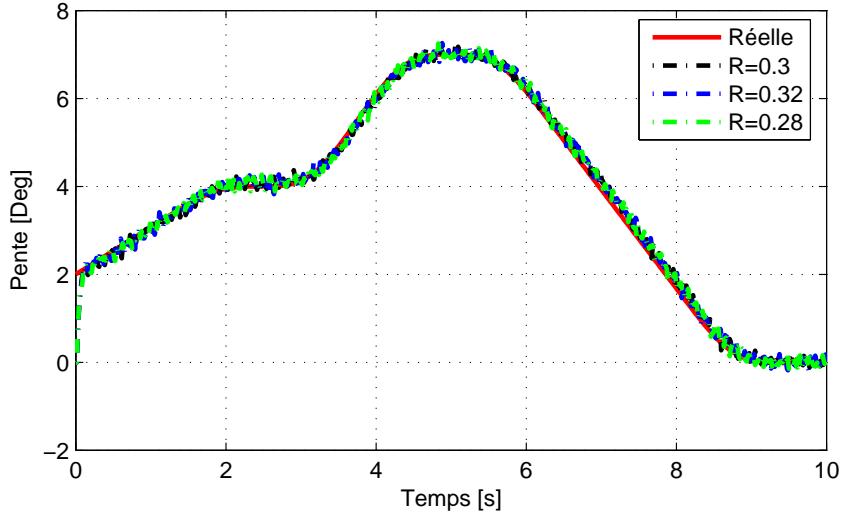


FIG. 5.10 – Robustesse de l'estimation de la pente vis-à-vis de la variation de rayon de pneu

Le tableau 5.2 montre les erreurs d'estimation des variables d'état du modèle bicyclette linéaire. En moyenne, ces erreurs sont inférieures à 3% et au maximum sont inférieures à 6.5%.

TAB. 5.2 – Erreur d'estimation des variables d'état du modèle linéaire - moy/max

ϵ	$\frac{mean(\epsilon_\beta)}{max(\beta)}$	$\frac{mean(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{mean(\epsilon_{\phi_v})}{max(\phi_v)}$	$\frac{mean(\epsilon_{\dot{\phi}_v})}{max(\dot{\phi}_v)}$
$\epsilon(\%)$	1.05	0.52	0.69	2.30
ϵ	$\frac{max(\epsilon_\beta)}{max(\beta)}$	$\frac{max(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{max(\epsilon_{\phi_v})}{max(\phi_v)}$	$\frac{max(\epsilon_{\dot{\phi}_v})}{max(\dot{\phi}_v)}$
$\epsilon(\%)$	2.78	1.20	1.43	5.5

5.2.3 Robustesse de l'observateur vis-à-vis de la vitesse du véhicule

Dans le modèle bicyclette, représenté par (5.5), la vitesse du véhicule est considérée comme un paramètre variable. Pour assurer la robustesse de l'observateur vis-à-vis de ce paramètre, nous avons réalisé plusieurs tests. Le résultat obtenu est montré sur la Fig. 5.15. Pour chaque valeur de $V \in \{15, 18, 22, 25\}$ nous avons tracé le dévers estimé. Ce résultat montre bien la robustesse de l'observateur PI vis-à-vis de la variation de la vitesse du véhicule.

5.3 Estimation des mouvements de la caisse

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, la reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule par des capteurs de vision embarqués dépend des mouvements de ces capteurs, donc des mouvements de la caisse suspendue. Cela est confirmé par les modèles de vision ou de stéréovision [Lab03, Lab05, Auf00a, Auf00b, Ned04]. Jusqu'à présent, les travaux développés dans la littérature [Auf00a, Ned04, Ber00] ne proposent pas des solutions efficaces à ce problème.

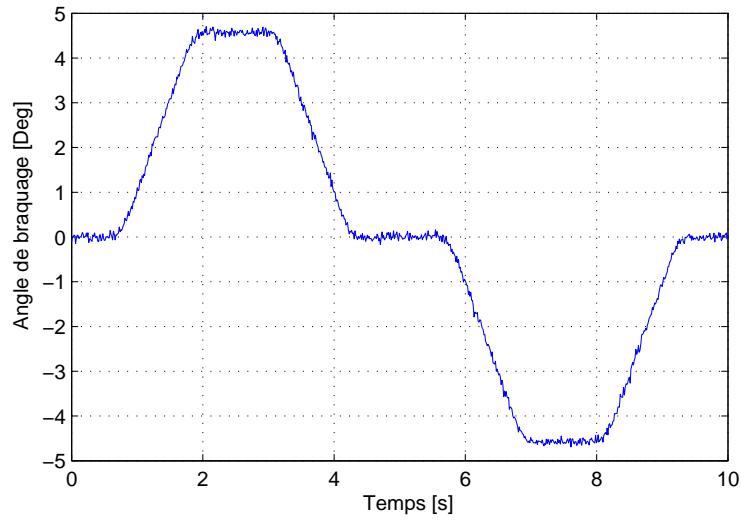


FIG. 5.11 – Angle de braquage

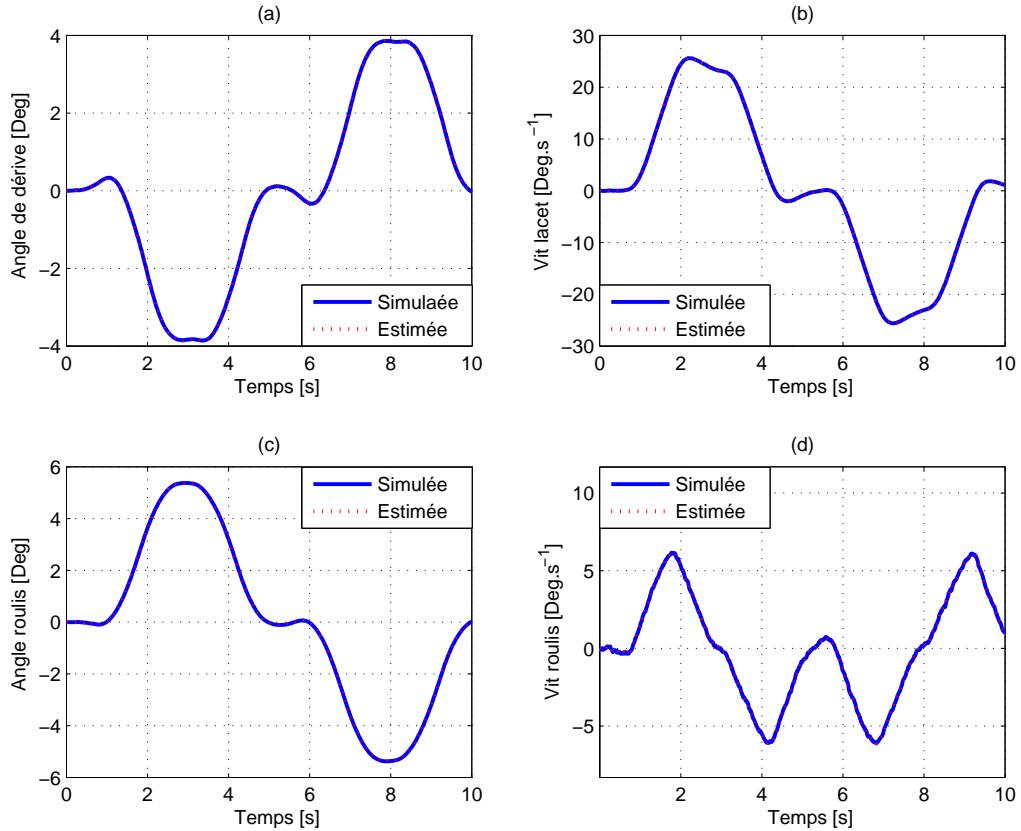


FIG. 5.12 – Variables d'état estimées et simulées : angle de dérive (a), vitesse de lacet (b), angle de roulis (c) et vitesse de roulis (d).

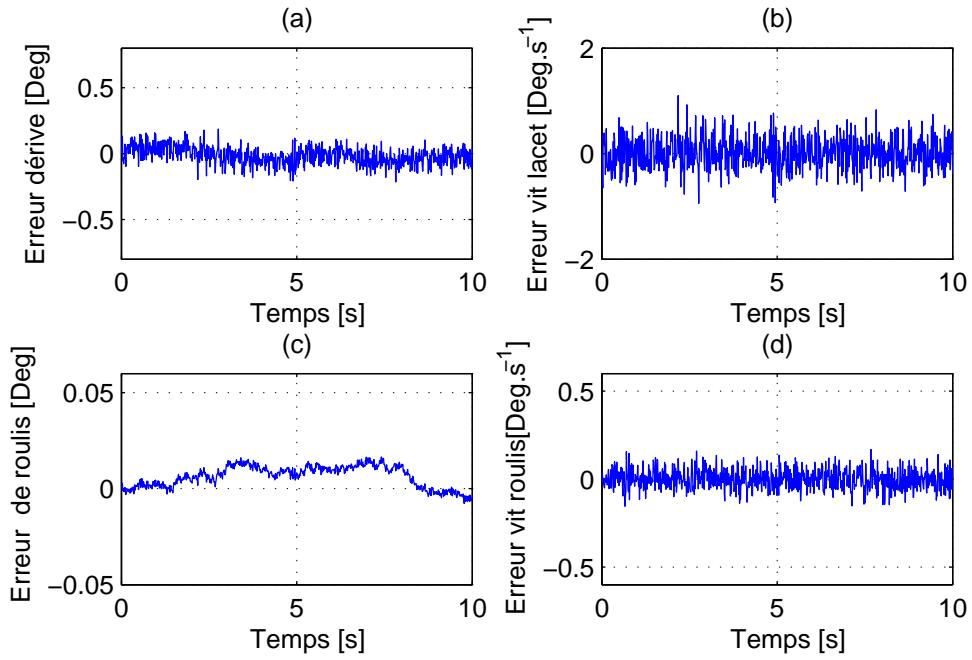


FIG. 5.13 – Erreurs d'estimation des variables d'état

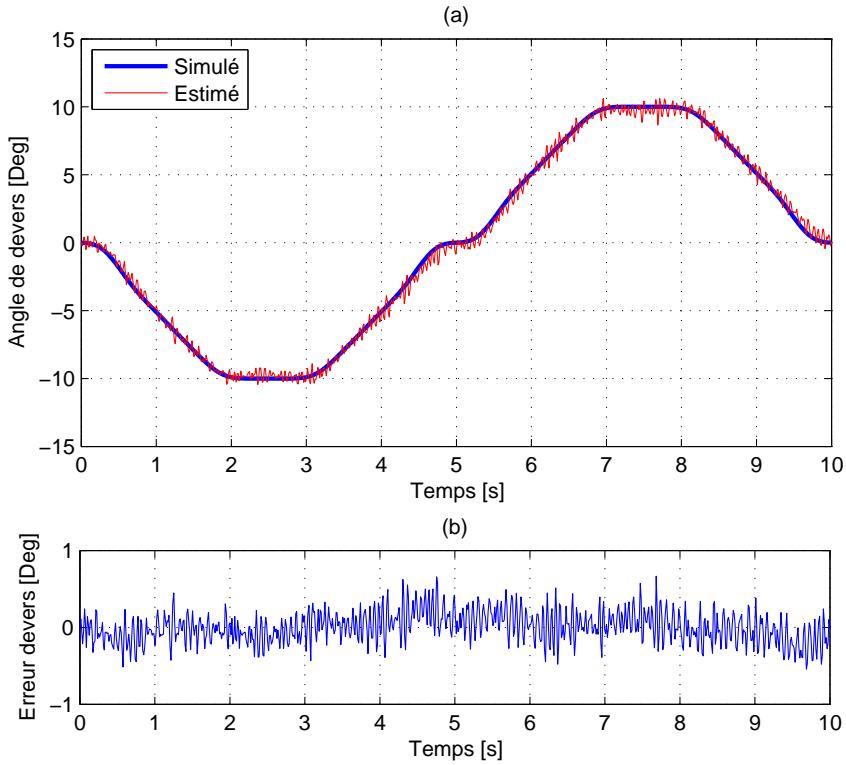


FIG. 5.14 – Dévers estimé et de référence

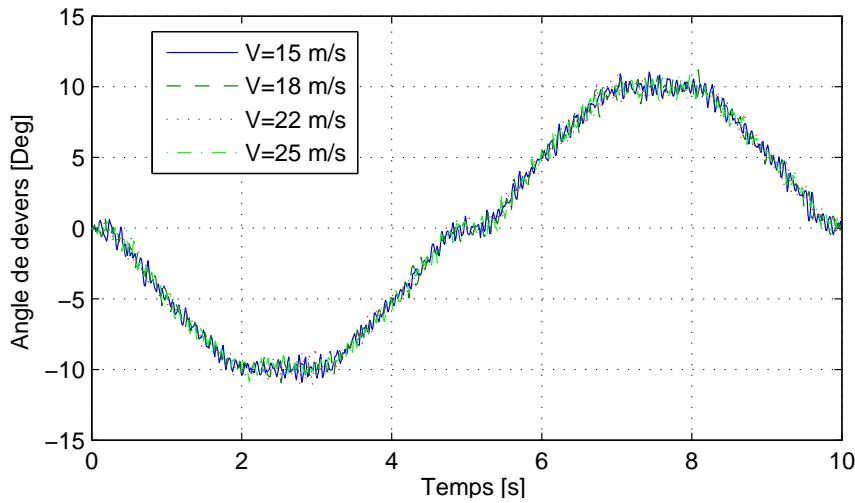


FIG. 5.15 – Robustesse de l'estimation du dévers vis-à-vis de la variation de la vitesse.

Ils se limitent à des routes planes et une localisation relative du véhicule. Ces hypothèses de route plane sont rarement vraies. L'objectif de cette section est de relaxer ces hypothèses en proposant une nouvelle méthodologie de reconstruction des mouvements de la caisse (angle de tangage, angle de roulis et le pompage), peu coûteuse, par une approche d'observateurs afin de bien reconstituer l'environnement à l'avant du véhicule.

5.3.1 Estimation de tangage et de pompage

La méthode d'estimation de roulis est développée dans la section ci-dessus (section 5.2). L'angle de tangage est reconstruit par une approche de modélisation multi-modèles, latéral et vertical. Lorsque le premier modèle est utilisé, l'angle de tangage est estimé par l'application d'un observateur linéaire à paramètres variants (LPV) sur le modèle cinématique du véhicule. Dans le deuxième cas, l'angle de tangage est reconstruit par la résolution d'un système différentiel de la dynamique verticale du véhicule.

Le modèle cinématique

On suppose que la centrale inertie est fixée au centre de gravité du véhicule et est orientée selon l'axe \mathbf{X}_c . On néglige le mouvement rotationnel de la terre. Les relations entre les vitesses angulaires du véhicule $\vec{\Omega} = [p \ q \ r]^T$ et les variations des angles d'Euler $\vec{\Theta} = [\phi_v \ \theta_v \ \psi]^T$ s'écrivent [Tse07, Seb08d, Ryu04] :

$$\dot{\phi}_v = p + (q \sin \phi_v + r \cos \phi_v) \tan \theta_v \quad (5.6)$$

$$\dot{\theta}_v = q \cos \phi_v - r \sin \phi_v \quad (5.7)$$

$$\dot{\psi} = (q \sin \phi_v + r \cos \phi_v) \sec \theta_v \quad (5.8)$$

Les deux équations (5.6) et (5.7) peuvent s'écrire :

$$\dot{\phi}_v = p + r\theta_v + q \sin \phi_v \tan \theta_v + r(\cos \phi_v \tan \theta_v - \theta_v) \quad (5.9)$$

$$\dot{\theta}_v = q - r\phi_v + q(\cos \phi_v - 1) + r(\phi_v - \sin \phi_v) \quad (5.10)$$

Écrites sous forme matricielle, les deux équations (5.9) et (5.10) deviennent :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_v \\ \dot{\theta}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_v \\ \theta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_{\phi_v} \\ \Delta_{\theta_v} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

avec $\Delta_{\phi_v} = q \sin \phi_v \tan \theta_v + r(\cos \phi_v \tan \theta_v - \theta_v)$ et $\Delta_{\theta_v} = q(\cos \phi_v - 1) + r(\phi_v - \sin \phi_v)$. Sachant que $\Delta_{\phi_v} \approx 0$ et $\Delta_{\theta_v} \approx 0$, le système (5.11) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_v \\ \dot{\theta}_v \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_v \\ \theta_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Le système (5.12) est linéaire à paramètres variants (LPV), il est sous la forme $\dot{x} = Ax + Bu$. $x = [\phi_v \ \theta_v]^T$ et $u = [p \ q]^T$ sont respectivement le vecteur d'état et le vecteur des entrées du système. A et B sont respectivement la matrice d'évolution et la matrice de commande du système.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Estimateur multi-modèles de l'angle de tangage

Afin de reconstruire l'angle de tangage pour l'ensemble de la dynamique du véhicule en présence de perturbations, nous avons opté pour une approche de modélisation multi-modèles, dont l'algorithme est schématisé par la figure (5.16). Notons que le système de l'équation (5.12) devient inobservable quand r s'annule. Les deux modèles sont choisis comme suit : soit r_0 un réel strictement positif de l'ordre de 0.01 rad.s^{-1} .

Premier cas ($|r| < r_0$) et ($\gamma_x \cong 0$) : il n'y pas de variation sur les angles d'Euler (roulis et tangage), cela correspond à une absence de dynamique, donc l'algorithme de programmation mémorise l'état précédent (état=mémoire).

Deuxième cas ($|r| < r_0$) et ($\gamma_x \neq 0$) : dans ce cas, sous contrainte de faibles glissements latéraux, la trajectoire du véhicule est considérée comme proche d'une ligne droite. La reconstruction de l'angle de tangage se fait par la résolution du système différentiel constitué des équations (2.58) et (2.61). Dans le but de simplifier les calculs, on suppose que la dérivée de l'accélération longitudinale du véhicule est nulle ($\gamma_x \cong C^{st}$). L'état stationnaire du véhicule est donné par :

$$\bar{z} = \bar{z}^* = C^{st}, \bar{\psi} = \bar{\psi}^* = C^{st}.$$

\bar{z}^* et $\bar{\psi}^*$ sont les valeurs de pompage et de tangage lors de l'accélération du véhicule sur une ligne droite. Ces valeurs sont solution du système algébrique suivant [Bro06] :

$$\begin{cases} (2k_1 + 2k_2)\bar{z}^* - (2k_1 l_f - 2k_2 l_r)\bar{\theta}^* = 0 \\ (2k_1 l_f - 2k_2 l_r)\bar{z}^* - (2k_1 l_f^2 + 2k_2 l_r^2)\bar{\theta}^* = mh\gamma_x \end{cases} \quad (5.14)$$

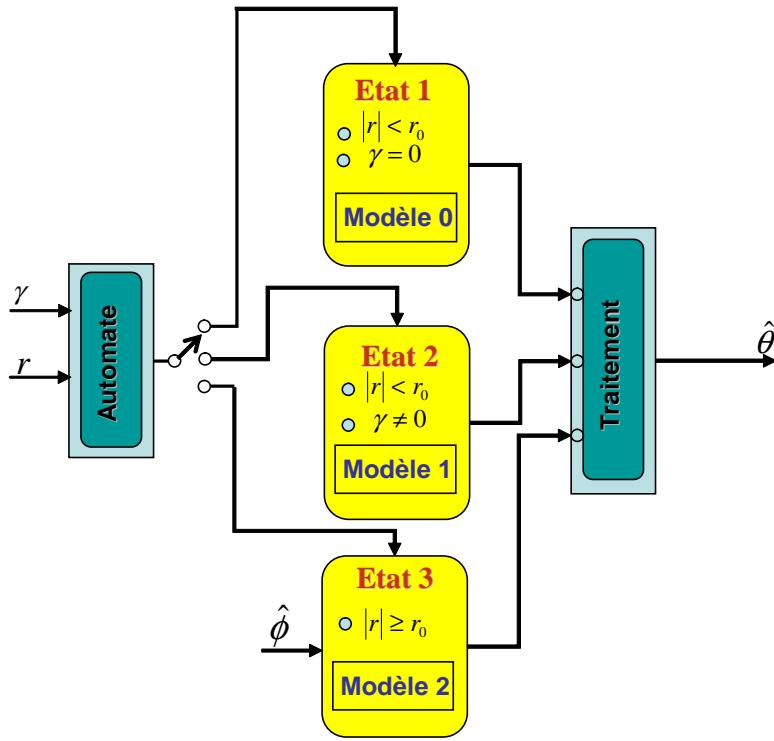


FIG. 5.16 – Schéma-bloc de reconstruction de l'angle de tangage

où encore :

$$\bar{z}^* = \frac{1}{(l_f + l_r)^2} \frac{2k_1 l_f - 2k_2 l_r}{2k_1 2k_2} m h \gamma_x$$

$$\bar{\theta}^* = \frac{1}{(l_f + l_r)^2} \left(\frac{1}{2k_1} + \frac{1}{2k_2} \right) m h \gamma_x$$

On notera que le pompage et le tangage sont proportionnels à l'accélération et qu'ils sont d'autant plus faibles que la raideur est grande.

Troisième cas ($|r| \geq r_0$) : l'angle de tangage est cette fois-ci estimé par l'application de l'observateur LPV [Bar00, Bar01] sur le modèle cinétique linéaire à paramètres variants représenté dans le système (5.12). La structure et les équations de l'observateur sont données dans [Bar00, Bar01].

Le vecteur des mesures \underline{y} et la matrice de sortie C du système sont donnés par :

$$\underline{y} = \hat{\phi}_v, C = [1 \ 0]$$

Remarque : Le déterminant de la matrice d'observabilité $Q = [C \ CA]^T$ est différent de zéro pour toute vitesse de lacet non nulle, ce qui implique que le système est observable pour toute valeur de $|r| \geq r_0$, même en présence de faibles perturbations sur la vitesse de lacet.

Résultats des estimations

Pour évaluer les performances de l'estimateur de tangage, le modèle du véhicule est excité par les trois vitesses de rotation p , q et r . Des bruits blancs gaussiens sont volontairement ajoutés sur toutes les variables d'entrées et de sorties mesurées du système comme le montre la figure (5.17).

Le véhicule est considéré initialement sur une route droite. A l'instant $t = 1s$, le véhicule aborde une portion de clohoïde positive, il se déplace par la suite sur une portion d'arc de cercle à l'instant $t = 2s$, avant de reprendre une clohoïde de courbure opposée à $t = 3s$. Par la suite, le véhicule enchaîne trois clohoïdes positive-négative-positive pour finir sur une ligne droite à l'instant $t = 9s$. A l'instant initial, le véhicule accélère fortement pendant $1.5s$ pour atteindre une vitesse de $15m/s$ ($54km/h$). Il garde cette vitesse constante jusqu'à $t = 8s$, puis il décélère pour s'arrêter à $t = 10s$. La route est supposée plane.

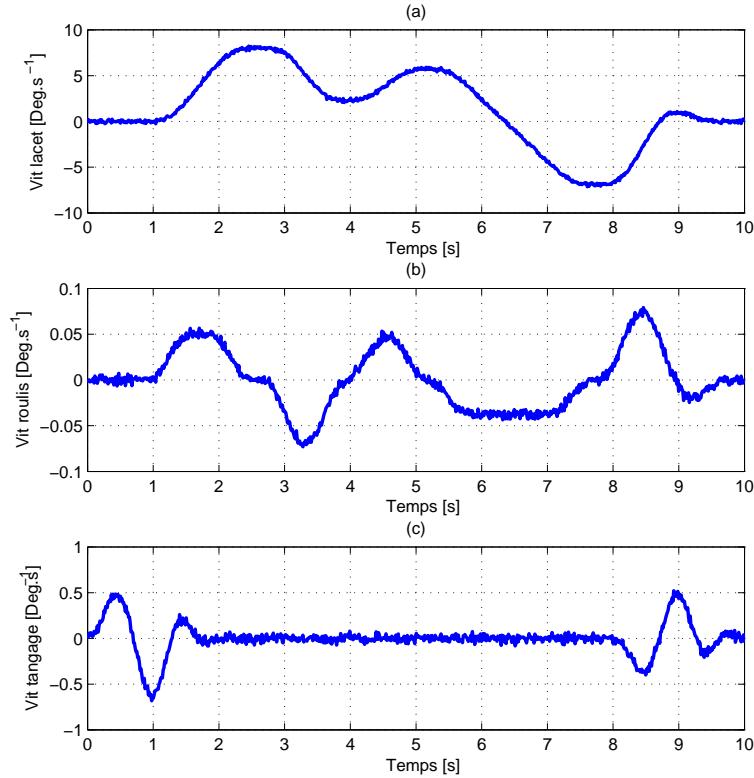


FIG. 5.17 – Vitesse de roulis, vitesse de tangage et vitesse de lacet

La figure (5.18) représente l'angle de roulis du véhicule (a) et l'angle de tangage (b). Les erreurs d'estimation sont présentées sur la figure (5.20). Ces erreurs sont en moyenne inférieures à 3% et au maximum inférieures à 5%. L'estimation du pompage est visible sur la Fig. 5.19. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

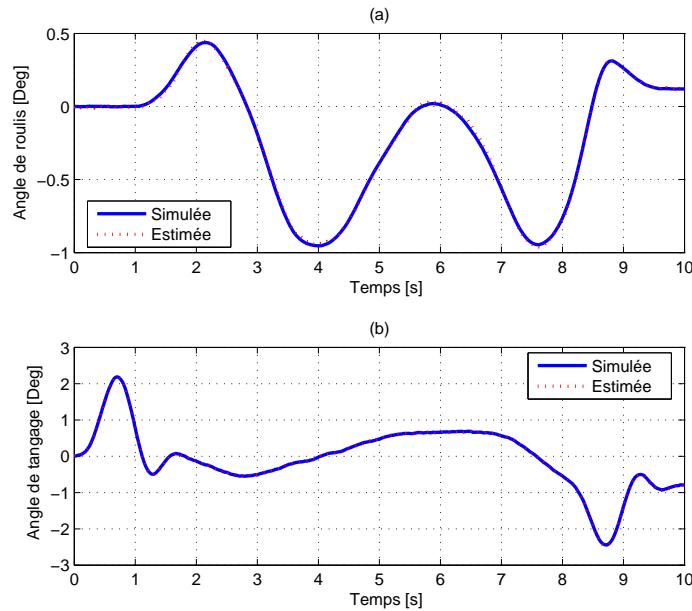


FIG. 5.18 – Variables d'état simulées et estimées : angle de roulis (a) et angle de tangage (b)

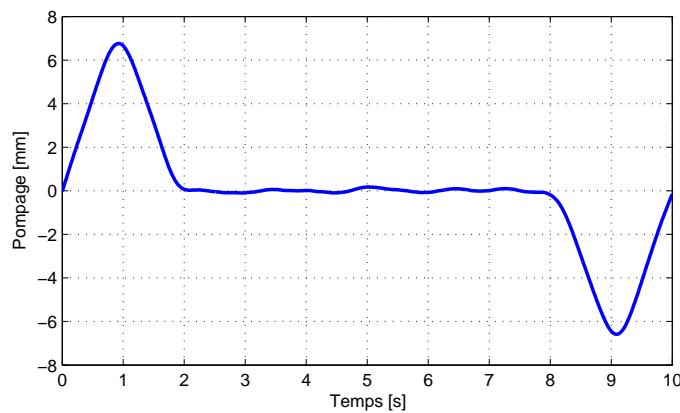


FIG. 5.19 – Résultat d'estimation de pompage

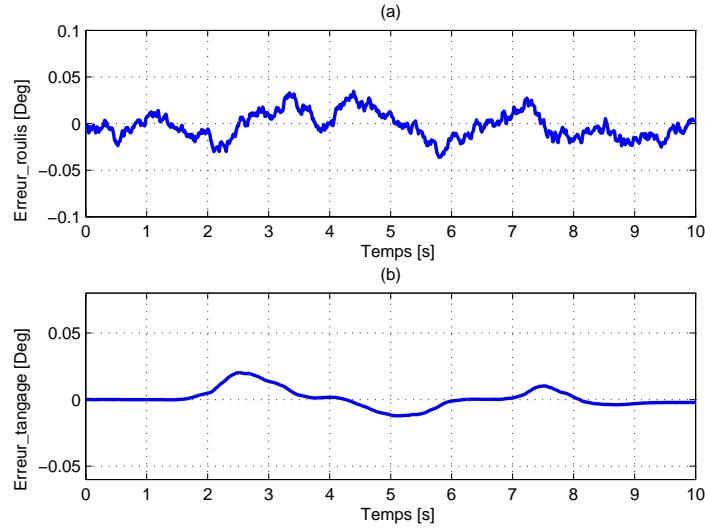


FIG. 5.20 – Erreurs d'estimation de roulis et de tangage

5.4 Observateur PI pour l'estimation de la courbure

La courbure de la route est un paramètre non négligeable pour la reconstruction de la géométrie de la route dans le but de développement des assistances à la conduite. A titre d'exemple, pour le contrôle latéral de la trajectoire d'un véhicule, il est primordial d'avoir accès à cette information pour de meilleures performances [Min08, Eid07].

On propose, dans cette section, un estimateur de la courbure de la route par application de l'observateur PI à entrées inconnues sur le modèle bicyclette augmenté à cinq variables d'état (angle de dérive, vitesse de lacet, angle de roulis, vitesse de roulis et l'angle de cap) comme le montre le système 5.15.

$$\dot{\bar{x}}_{au} = \bar{\bar{A}}_{au} \bar{x}_{au} + \bar{\bar{B}}_{au} \bar{u}_{au} + \bar{\bar{B}}_{au_1} C_r + \bar{\bar{B}}_{au_2} f_g \quad (5.15)$$

avec

$$\bar{\bar{A}}_{au} = \begin{bmatrix} -\frac{I_e C_0}{I_x m v} & -1 - \frac{I_e C_1}{I_x m v^2} & 0 & \frac{h_r (m g h_r - k_r)}{I_x v} & -\frac{h_r l_r}{I_x v} \\ -\frac{C_1}{I_z} & -\frac{C_2}{I_z v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{C_0 h_r}{I_x} & -\frac{C_1 h_r}{I_x v} & 0 & \frac{m g h_r - k_r}{I_x} & -\frac{b_r}{I_x} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\overline{B}}_{au} = \begin{bmatrix} \frac{I_e C_{sf}}{I_x m v} \\ \frac{l_f C_{sf}}{I_z} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{C_{sf} h}{I_x} \end{bmatrix}, \quad \overline{\overline{B}}_{au_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \overline{\overline{B}}_{au_2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m v} \\ \frac{l_g}{I_z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les variables d'état de ce modèle sont :

$$\overline{x}_{au} = [\beta \ \dot{\psi} \ \Psi \ \phi_v \ \dot{\phi}_v]^T$$

et son vecteur d'entrée est constitué d'une entrée connue (l'angle de braquage) et de deux entrées inconnues (la force de vent latéral f_g et la courbure $C_r = \frac{1}{R_r}$, R_r est le rayon de courbure). Nous considérons que le véhicule est muni d'une seule caméra en vision frontale, qui fournit l'angle de cap relatif Ψ .

5.4.1 Adaptation du système pour la conception de l'observateur

Pour pouvoir appliquer l'observateur PI à entrées inconnues au modèle du véhicule représenté par le système 5.15. Nous avons considéré les forces du vent comme une entrée inconnue, tandis que la courbure de la route est considérée comme un signal d'erreur. Quatre mesures sont disponibles pour la synthèse de cette observateur : l'angle de dérive latérale du véhicule estimé par le filtre de Kalman étendu (EKF), la vitesse de lacet, la vitesse de roulis du véhicule mesurées par des gyromètres et l'angle de cap fourni par une caméra frontale embarquée sur le véhicule. Le vecteur des mesures y_{au} et la matrice des sorties C_{au} sont donc donnés par :

$$y_{au} = [\beta \ \dot{\psi} \ \Psi_r \ \dot{\phi}_v]^T, \quad C_{au} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Remarque : La dynamique du roulis peut être négligée, sans impact important sur les résultats de l'estimation de la courbure de la route C_r . Cela ramène le système (??) à trois variables d'état (β , $\dot{\psi}$ et Ψ)[Mam06a, Mam06b].

5.4.2 Résultats des estimations

L'angle de braquage appliqué au modèle et l'angle de cap Ψ sont visibles respectivement sur les figures 5.21-a et Fig. 5.21-b. La vitesse du véhicule est maintenue fixe à $20m/s$ ($72km/h$). Des bruits blancs gaussiens sont volontairement ajoutés à toutes les variables d'entrées et de sorties mesurées du modèle.

La courbure de la route et son estimée obtenue par l'application de l'observateur PI sont montrées sur la figure 5.22. L'erreur moyenne de l'estimation est de 1.13%, l'erreur maximale est de 5.45%. Ce résultat est concluant.

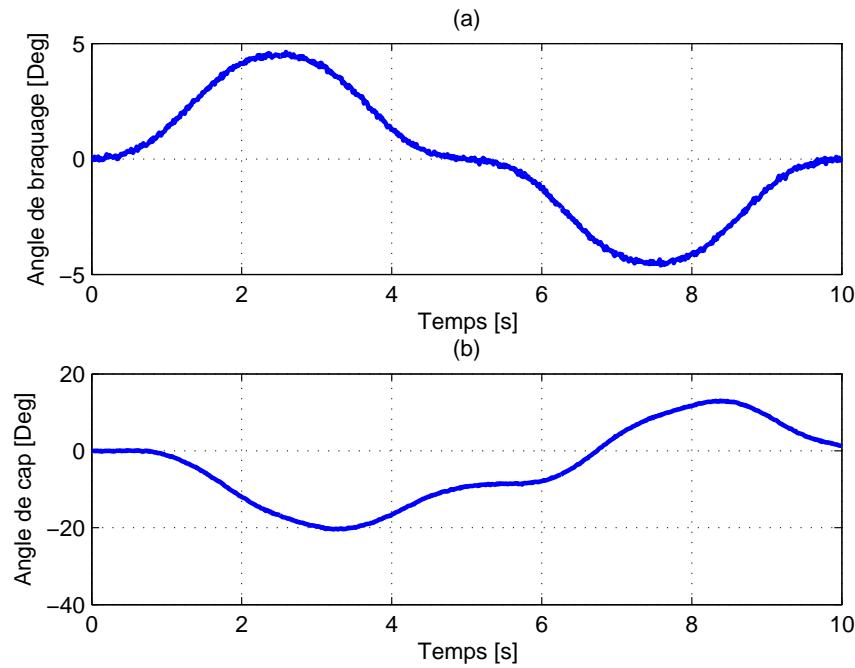


FIG. 5.21 – L'angle de braquage appliqué aux roues avant

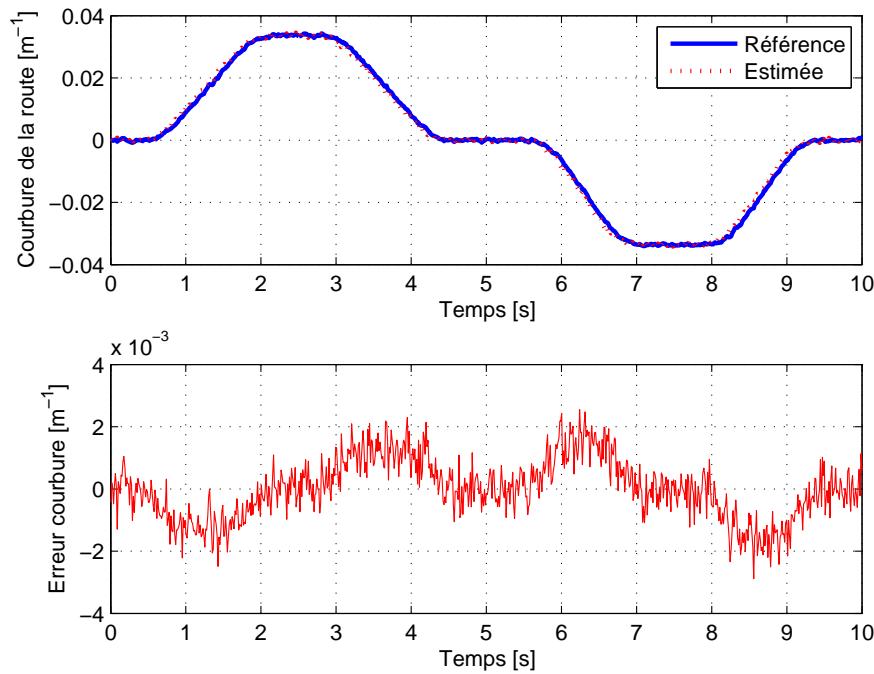


FIG. 5.22 – Résultat d'estimation de la courbure de la route

5.4.3 Robustesse de l'observateur vis-à-vis des variations de la vitesse du véhicule

La figure 5.23 montre le résultat de test de robustesse de l'estimation de la courbure de la route vis-à-vis de la variation de la vitesse du véhicule. Le résultat est très satisfaisant.

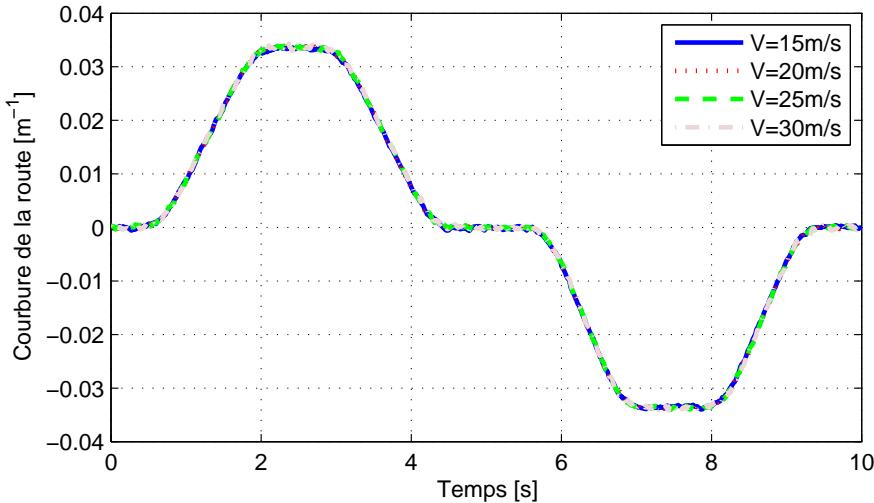


FIG. 5.23 – Robustesse de l'estimation de la courbure vis-à-vis des variations de la vitesse du véhicule

5.5 Conclusions

Dans ce chapitre, une synthèse d'un ensemble d'observateurs en cascade a été présentée, afin d'estimer les mouvements de la masse suspendue du véhicule et pour reconstituer les différents attributs de la route que sont : la pente, le dévers et la courbure.

Nous avons développé une méthode de reconstruction de la pente, par application dans un premier temps du filtre de Kalman étendu sur le modèle non-linéaire du véhicule à quatre roues qui permet d'estimer les forces de contact pneumatique chaussée et les variables d'état du véhicule. Dans un deuxième temps, nous avons appliqué un autre observateur de type Luenberger sur le modèle longitudinal seul pour estimer la pente de la route.

Nous avons montré la possibilité d'estimer convenablement le roulis du véhicule, le dévers de la route et la courbure par application de l'observateur proportionnel intégral sur le modèle bicyclette et sur le modèle bicyclette augmenté. Des études d'observabilité et des tests de robustesse vis-à-vis des paramètres variables ont été réalisés. Les résultats sont très concluants.

Une partie de ce chapitre est consacrée à l'estimation des mouvements de la caisse du véhicule par une approche multi-modèles, multi-observateurs. Les différentes variables estimées seront utilisées dans le chapitre suivant pour la reconstruction de la géométrie de la route dans le repère absolu et pour l'identification des variations des positions et les inclinaisons des capteurs de vision embarqués.

6

Numérisation et estimation 3D de la géométrie de la route dans un repère absolu

Sommaire

6.1	Architecture globale	114
6.1.1	Les capteurs	114
6.1.2	Traitement de données	115
6.1.3	Numérisation de la route	115
6.2	Localisation du centre de la voie	116
6.2.1	Résultats de localisation	116
6.3	Numérisation et reconstruction 3D de la route	119
6.4	Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu	122
6.4.1	Reconstruction de la route par stéréovision	122
6.4.2	Reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule par stéréovision dans le repère absolu	124
6.5	Conclusions	130

Même si la plupart des systèmes actuellement disponibles fonctionnent sans perception de la route, les recherches ont montré que le contrôle de la stabilité du véhicule est fortement lié à la géométrie de la route [Tse01, Tse99] et en particulier la pente, le devers, la courbure et la largeur. Bien que ces attributs routiers soient presque invariants dans le temps et lentement variables dans l'espace, et donc, *a priori*, possible à enregistrer sur une cartographie numérique, leur recueil, au niveau de précision voulu engendrent des coûts élevés.

De nombreux travaux, développés dans la littérature, ont pour but de reconstituer la géométrie de la route [Bra95, Auf00a, Auf00b, Bro95, Lab03, Ben07, Ben08, Cou02] en utilisant la vision artificielle (systèmes de visions mono-caméra ou à plusieurs caméras, embarqués sur

le véhicule). La détection des bords de la voie de circulation, l'estimation de sa géométrie et la localisation du véhicule sont les points essentiels dans ce contexte. Ces travaux ont montré de nombreuses limites, il est par exemple impossible de faire la distinction entre une manoeuvre freinage et une montée de route, ou encore il est impossible de calculer avec une précision donnée la distance à un obstacle dans le cas d'une route non plane. En effet, la perception de l'environnement à l'avant du véhicule par des capteurs embarqués est sensible aux variations de la position et de l'inclinaison de ces capteurs, donc aux mouvements du véhicule (pompage, tangage et au roulis) et à la géométrie de la route.

Notre objectif, à travers ce chapitre, est de surmonter ces limites en proposant une nouvelle méthode fiable et robuste de numérisation et d'estimation 3D de la géométrie de la route dans un repère absolu. Cette méthode est fondée sur la localisation du véhicule en trois dimensions par un estimateur IMM (Interaction Multi-Modèle) développé au LIVIC [Ndj07, Ndj08]. Plus précisément, connaissant l'écart latéral du véhicule par rapport à la route, on en déduit les coordonnées du centre de la voie, auxquelles on associe les valeurs des différents attributs (pente, devers, courbure et largeur) pour former un tableau numérique de la géométrie 3D de la route.

Les estimateurs de la pente, du devers et de la courbure ont été étudiés dans le chapitre 5. L'algorithme d'estimation de la largeur de la route par une caméra frontale a été développé au LIVIC, son principe est détaillé dans [Lab04a, Ben07].

6.1 Architecture globale

Le schéma bloc global de la structure proposée est visible sur la Fig. 6.1. On peut y distinguer trois niveaux principaux : l'acquisition des données de capteurs, l'estimation des attributs, l'association des différentes données dans un tableau numérique.

6.1.1 Les capteurs

Plusieurs capteurs sont nécessaires, ils sont tous embarqués dans le véhicule expérimental. L'ensemble des capteurs utilisés peut être divisé en deux groupes :

- **Capteurs proprioceptifs** : Ces capteurs fournissent des informations relatives à la dynamique intrinsèque du véhicule. On peut citer la centrale inertuelle (IMU¹⁹) et le capteur optique de l'angle de braquage, auxquels on peut ajouter les capteurs du système ABS. Le système ABS donne les vitesses angulaires des quatre roues. L'IMU est composée d'un accéléromètre et d'un gyroscope sur chaque axe du véhicule. Par conséquent, ce capteur fournit directement les accélérations du véhicule et les vitesses de rotation autour de chaque axe. Le capteur optique de l'angle de braquage donne indirectement l'angle de braquage des roues avant du véhicule. En effet, ce capteur mesure l'angle au volant en utilisant un dispositif optique. Cet angle est par la suite transformé par le biais d'un modèle de la colonne de direction afin d'obtenir l'angle de braquage.
- **Capteurs extéroceptifs** : on peut citer comme principaux éléments, le capteur de vision (caméra) et le capteur GPS. Ils fournissent des informations concernant l'environnement du véhicule. Le capteur de vision fournit des données sur la route comme la largeur, l'angle de cap et l'écart latéral. Le système GPS donne accès aux coordonnées 3D du véhicule. Les données du capteur GPS sont utilisées pour la mise à jour de l'algorithme de localisation par IMM.

¹⁹IMU : Inertial Measurement Unit

6.1.2 Traitement de données

Le traitement de données est composé de trois algorithmes.

Premièrement, l'estimation de la pente est obtenue par l'application du filtre de Kalman étendu (EKF) sur le modèle non-linéaire du véhicule (voir chapitre V). Le dévers et la courbure de la route sont reconstitués par l'application de l'observateur proportionnel intégral sur le modèle bicyclette du véhicule (chapitre V).

Deuxièmement, la largeur de la route est estimée en utilisant un filtre de Kalman et le modèle de vision [Lab04a].

Troisièmement, une localisation 2D du véhicule est effectuée en utilisant une technique robuste par IMM. Afin d'augmenter cette localisation en 3D, un EKF est mis en œuvre afin d'estimer l'altitude Z_a . Les données de cette localisation sont ensuite utilisées pour calculer celles du centre de la voie, connaissant l'écart latéral et la hauteur de capteur GPS par rapport au plan de la route.

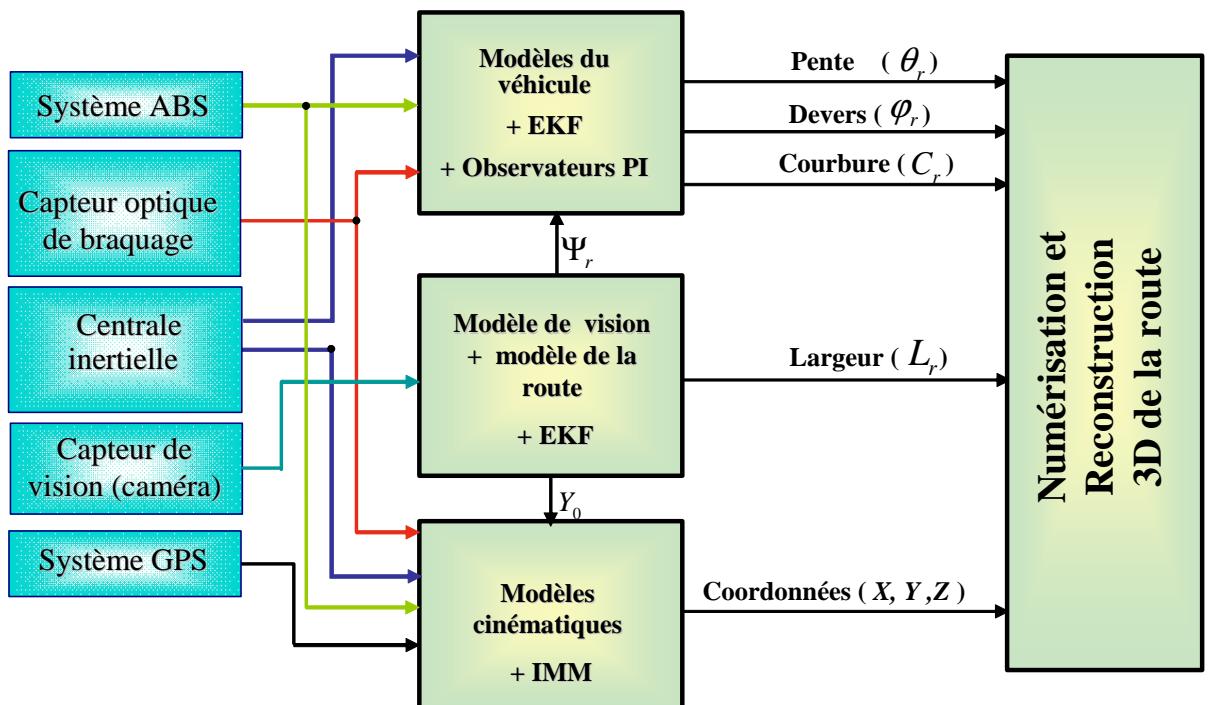


FIG. 6.1 – Architecture globale de l'estimation 3D de la géométrie de la route

6.1.3 Numérisation de la route

La numérisation et la reconstruction 3D de la route est effectuée à ce niveau. Pour chaque points de coordonnées X , Y et Z localisé sur le centre de la voie, on associe les valeurs des différents attributs de la route (pente, dévers, courbure et la largeur). Ces données sont ensuite enregistrées dans un tableau numérique comme le montre la section 6.3.

Remarque : Dans cette thèse, nous n'étudierons pas les méthodes de localisation 3D et de l'estimation de la largeur de route et de cap relatif, néanmoins on oriente le lecteur vers [Ndj07, Ndj08, Lab04a, Ben08, Mor07]. La largeur de la route est le paramètre le plus simple à calculer

lorsqu'on dispose des bords de la route. La largeur de la route est définie comme étant la distance euclidienne entre les deux bords segmentés dans un même profil (en supposant que le mouvement de voiture est toujours tangent à la direction de la route).

6.2 Localisation du centre de la voie

A l'opposé de l'estimation classique fondée sur un seul modèle, l'approche de localisation 2D par IMM développée au LIVIC, utilise les données du GPS, d'une centrale inertuelle et plusieurs filtres de Kalman, intégrant chacun un modèle linéaire d'évolution et représentant un mode de dynamique particulier (mode ligne droite, mode virage constant, mode accélération constante, etc.). Ces filtres sont implantés en parallèle et interagissent à l'entrée du système. La sortie de l'estimateur multi-modèles est obtenue soit par sélection du meilleur filtre, ou par une méthode de fusion des sorties des différents filtres. Le principal avantage de cette approche est qu'elle garantit une localisation au niveau absolu et qu'elle reste fiable et robuste dans les situations de dégradation du signal GPS.

6.2.1 Résultats de localisation

Afin d'évaluer les performances de l'approche de localisation par IMM. On a réalisé plusieurs essais, la piste sur laquelle les tests sont menés est visible sur la Fig. 6.2. Elle est située à Versailles/France, caractérisée par de fortes courbures et de longues lignes droites, elle est d'une longueur de 5.5km environ. Une partie de cette piste est située dans une forêt (zone cadrée de la Fig. 6.2). Le véhicule expérimentale est équipé d'une unité de mesure inertuelle (Crossbow VG400), qui fournit la vitesse de lacet ($\dot{\psi}$) et les accélérations γ_x , γ_y et γ_z . Le véhicule se déplace à une vitesse moyenne de 15ms^{-1} . Pendant les essais, la trajectoire de référence est obtenu par un GPS-RTK (Real Time Kinematic GPS (Thales)) d'une précision de l'ordre de 10^{-2}m . Le résultat de localisation est visible sur Fig. 6.2.

Les figures 6.3 et 6.4 montrent les enveloppes de confiance à 3σ et les erreurs de positionnement sur chaque axe, respectivement \mathbf{X}_r et \mathbf{Y}_r . Sur l'axe \mathbf{X}_r , dans la plupart du temps, l'erreur de positionnement est quasiment nulle. La valeur maximale de cette erreur est d'environ 6m . Elle est obtenue après une durée de 200s . Ce maximum apparaît dans la zone de piste entourée par la forêt (dans cette zone le signal GPS est de "mauvais qualité"). Sur l'axe \mathbf{Y}_r , l'erreur moyenne de positionnement est de $2,5\text{m}$, et au maximum est de 7m . D'après la Fig. 6.4, l'erreur maximale est obtenue en même zone que sur l'axe \mathbf{X}_r .

La courbe de la Fig. 6.5 est obtenue par l'application du filtre de Kalman sur le modèle vertical de la cinématique du véhicule. La vitesse et l'accélération verticale du véhicule sont considérées comme entrées du système. L'erreur d'estimation moyenne est de 0.46m , elle est au maximum de 1.23m . Le résultat est donc satisfaisant.

Les coordonnées du centre de la voie sont obtenues par recalage de celles du véhicule. L'altitude est corrigé par soustraction à chaque instant de la hauteur du centre de gravité du véhicule par rapport au sol (le capteur est GPS est supposé qu'il fournit des données au niveau du centre de masse du véhicule), du résultat de l'estimation de l'altitude du véhicule (Le système GPS est supposé placé au niveau du centre de masse). La coordonnée latérale est obtenue par sommation de celui du véhicule avec l'écart latéral (distance entre le centre de la voie et le centre de masse du véhicule G).

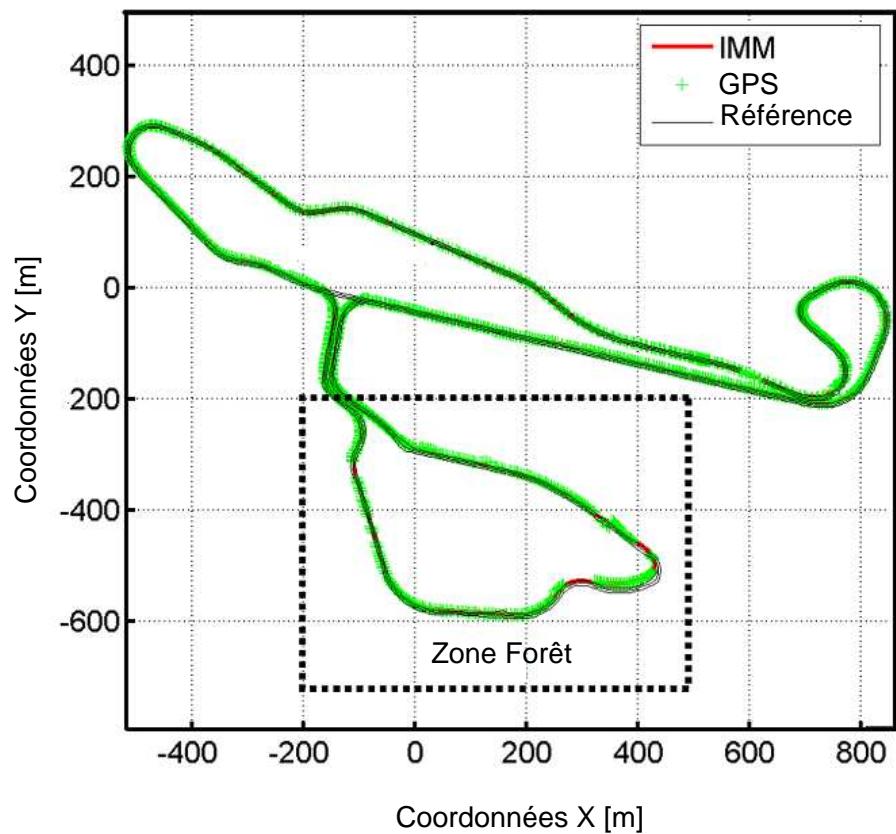


FIG. 6.2 – Résultat de localisation en 2D

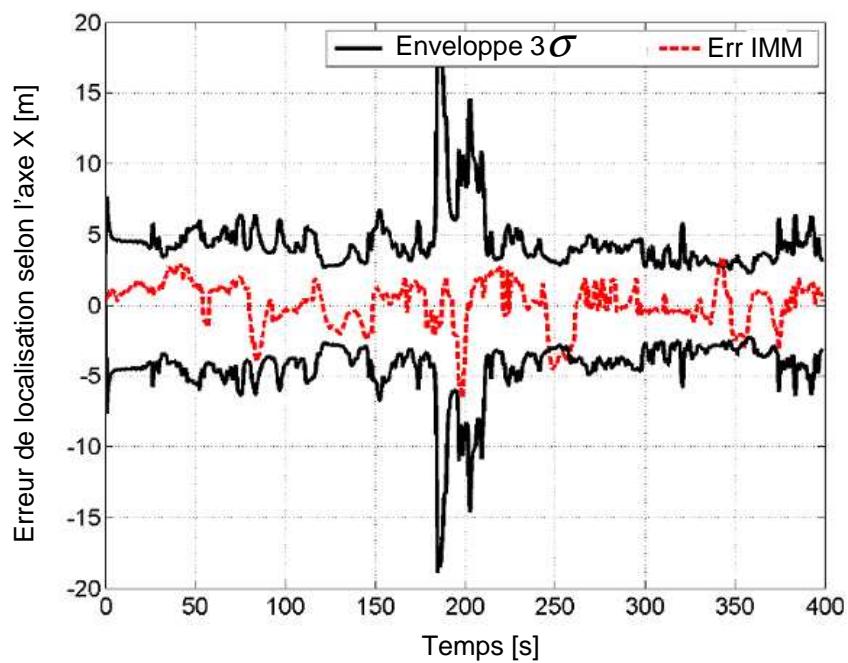


FIG. 6.3 – Erreur de positionnement selon l'axe X_r et l'enveloppe de confiance 3σ

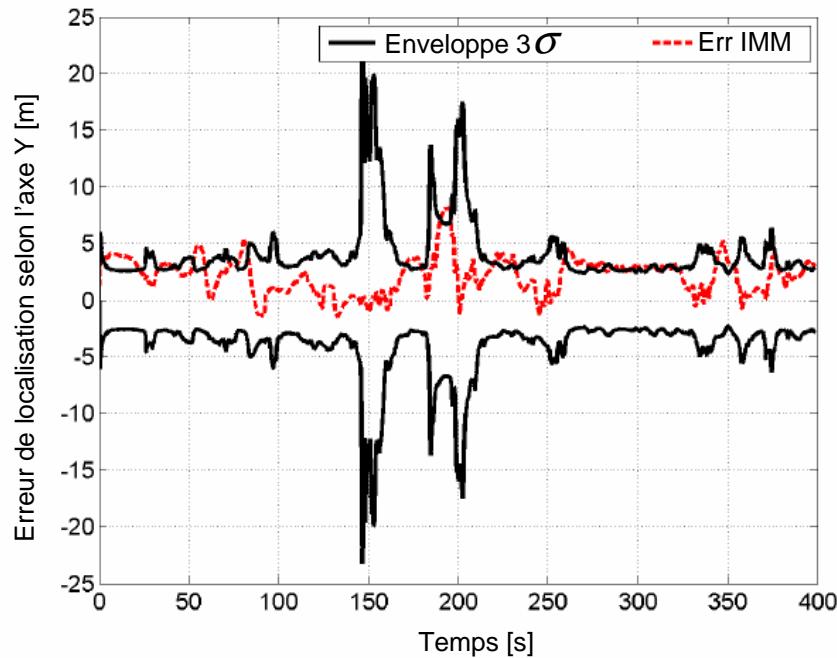


FIG. 6.4 – Erreur de positionnement selon l'axe \mathbf{Y}_r et l'enveloppe de confiance 3σ

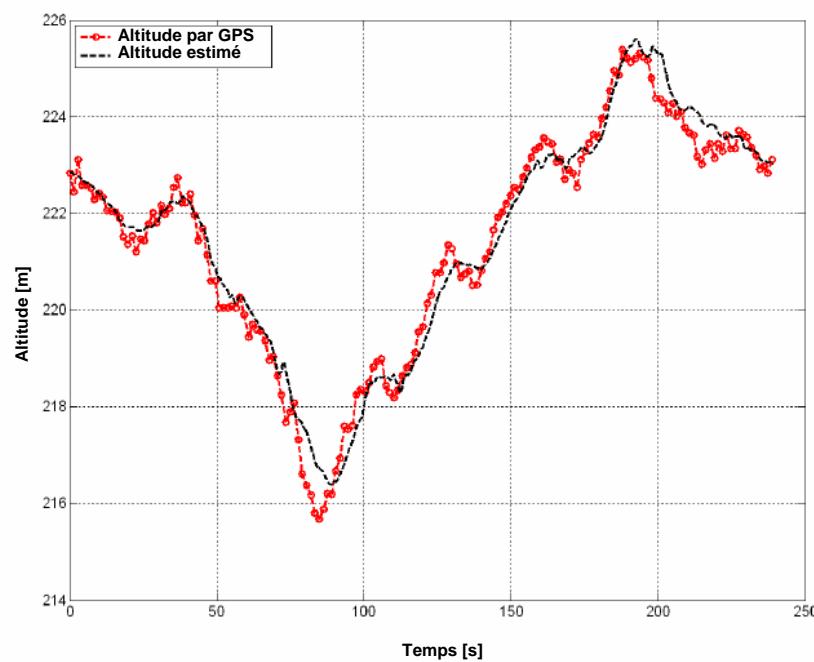


FIG. 6.5 – Résultat d'estimation de l'altitude du véhicule

6.3 Numérisation est reconstruction 3D de la route

L'idée générale de la numérisation 3D de la route, consiste à localiser le véhicule en 3D puis à procéder à un recalage pour obtenir la position du centre de la voie et d'associer à chaque positionnement les valeurs numériques des différentes attributs de la route.

Dans cette partie, la géométrie de la chaussée est reconstituée en trois dimensions, par la fusion des données d'estimation des attributs de la route et les données de localisation 3D du véhicule. A chaque point du centre de la voie de coordonnées X_p , Y_p et Z_p , on associe les valeurs numériques des attributs (pente, dévers, courbure et largeur) correspondantes. Le résultat obtenu est montré sur le tableau 6.1 pour la partie encerclée de la figure 6.9. La reconstruction en trois dimensions de la route est visible sur la Fig. 6.9. La figure 6.6 montre le résultat d'estimation de la courbure de la route (a), vue de dessus de la piste (b) et les coordonnées X et Y du circuit. Les autres attributs sont visibles sur les, Fig. 6.7 et Fig. 6.8, respectivement pour la pente et le devers. On présente dans le chapitre suivant les résultats des validations.

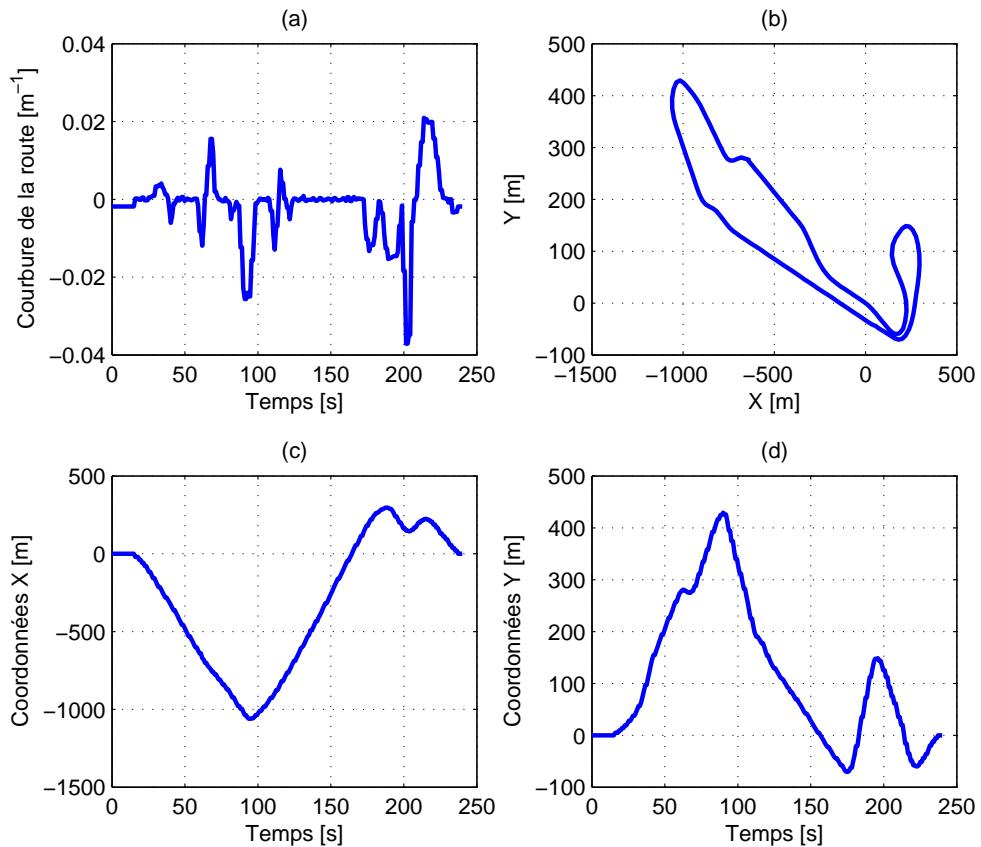


FIG. 6.6 – Résultat d'estimation de la courbure de la route (a), Vue de dessus de la piste (b) et les coordonnées X et Y de la piste, respectivement (c) et (d)

La caractérisation géométrique tridimensionnelle de la chaussée, peut être utile au développement d'applications dans trois principaux domaines que sont :

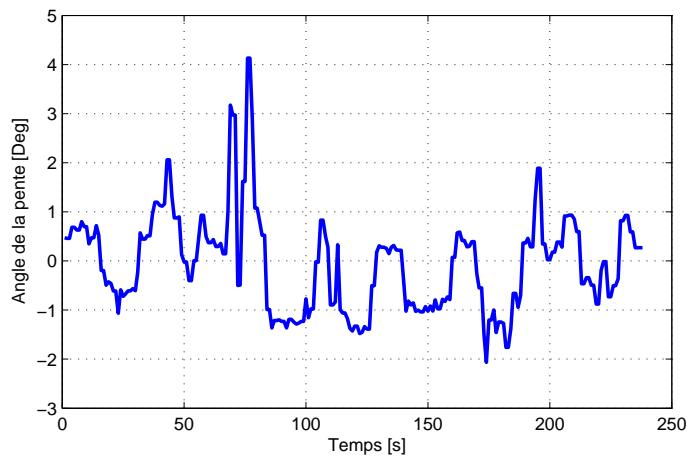


FIG. 6.7 – Résultat d'estimation de la pente de la route

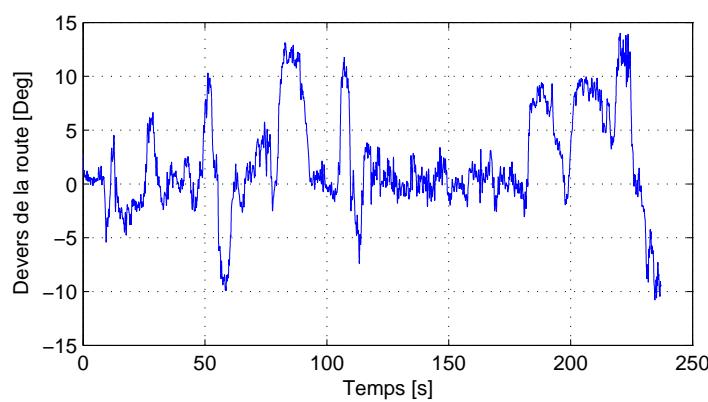


FIG. 6.8 – Résultat d'estimation du dévers de la route

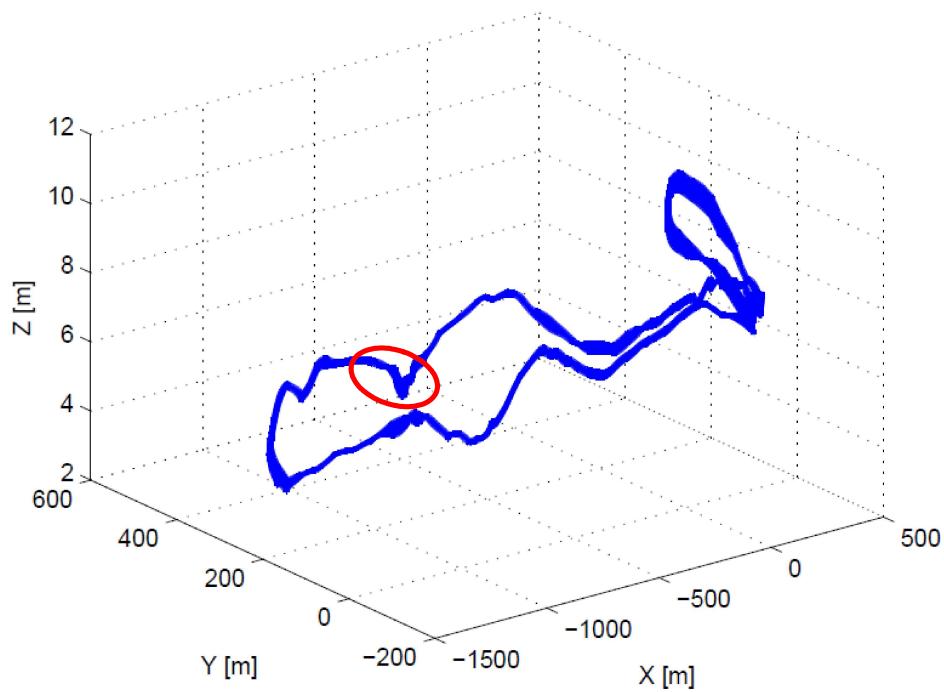


FIG. 6.9 – Résultat d'estimation 3D de la géométrie de la route

- Les assistances à la conduite :
 - Localisation absolue du véhicule par rapport à la route.
 - Positionnement en absolu de la route.
 - Cartographie en trois dimensions (3D).
 - Connaissance de la géométrie de la route au-delà de la portée des capteurs.
 - Amélioration des systèmes d'aide à la conduite existants comme : la détection d'obstacle, la localisation 2D et 3D, le contrôle latéral et longitudinal, la génération d'alertes, la détection de risque de sortie de route...
 - Connaissance du réseau routier.
- La construction routière :
 - Détermination des modes de rectification et de mise en conformité des tracés routiers.
 - Identification des zones accidentogènes.
- La dynamique automobile, pour fournir les données d'entrée (positions instantanées du véhicule) :
 - Pour les modèles de simulation du comportement dynamique des véhicules.
 - Pour les modèles utilisés en reconstruction cinématique des accidents.
 - Pour les simulateurs de conduite.

on peut aussi imaginer d'autres domaines d'application tel que l'optimisation de la consommation en connaissant la pente de la route...

TAB. 6.1 – Résultat de numérisation de la route

Coordonnées X_a, Y_a et Z_a			Attributs de la route			
$X_a(m)$	$Y_a(m)$	$Z_a(m)$	$\theta_r(Deg)$	$\phi_r(Deg)$	$C_r(m^{-1})$	$L_r(m)$
-720,19	275,32	-2,7356	0,40057	5,8729	0,008587	3,5
-730,48	274,57	-2,8457	0,40057	5,8729	0,008587	3,5
-740,25	274,60	-2,8258	-0,00785	9,5437	0,015555	3,5
-750,36	277,89	-2,5059	-0,00785	8,2454	0,019440	3,5
-760,83	281,29	-2,3201	-0,00765	9,0014	0,015693	3,5
-770,85	287,73	-2,2261	-0,93204	3,6818	0,001977	3,5
-790,68	298,68	-2,1562	-0,49743	-2,2728	0,000890	3,5
-800,54	310,97	-2,1163	-0,37176	-2,1672	0,000026	3,5

6.4 Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu

Dans la précédente partie, nous avons développé une méthodologie de numérisation et de reconstruction 3D de la géométrie de la route dans le repère absolu, au niveau du véhicule. Dans des cas particuliers d'applications, cette méthode peut présenter des limites. Par exemple, si les systèmes embarqués n'ont pas accès à une base de données cartographique détaillée, il est impossible de prédire la géométrie de l'infrastructure à l'avant du véhicule. Or, cette information est nécessaire pour de nombreuses assistances comme le développement d'alarme.

La vision artificielle permet une reconstruction en 3D de la géométrie de la route et à l'avant du véhicule mais dans le repère relatif aux capteurs embarqués. On présente dans cette section une solution robuste à ce problème -une méthodologie de reconstruction de la géométrie 3D de la route à l'avant du véhicule- par fusion des données d'observateurs développés dans le chapitre 5 et des données de la vision artificielle (stéréovision).

6.4.1 Reconstruction de la route par stéréovision

Notre objectif n'est pas de développer les méthodes de la stéréovision, nous présentons quoi qu'il en soit un rapide état de l'art sur les principaux travaux existants. Ils permettent [Ned04, Lab03, Sim04] de reconstruire le profil 3D de la voie par triangulation, et ainsi de s'affranchir des hypothèses simplificatrices utilisées dans la plupart des algorithmes de détection monoculaire telles que : route plane, angle de cap constant, angle de roulis nul. Les auteurs, dans [Ned04], modélisent la voie de circulation et la position du véhicule par un vecteur d'état à plusieurs paramètres, estimés à l'aide d'images stéréoscopiques. Le profil vertical de la voie de circulation est obtenu à partir d'une carte de disparité. Le profil horizontal est estimé en utilisant une seule image de la paire stéréoscopique, de façon similaire à [Auf01].

On donne, ci-dessous, les équations principales dans le cas de reconstruction par stéréovision à deux caméras identiques, embarquées sur le véhicule à une hauteur de Z_0 par rapport au sol

6.4. Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu

et séparées par une distance de b_c (voir la Fig. 6.10).

Soit un point P_a de coordonnées X_a, Y_a et Z_a dans le repère absolu, projeté par les points $P_R = (u_R, v_R)^t$ sur l'image droite et $P_L = (u_L, v_L)^t$ sur l'image gauche, tel que :

$$\begin{cases} u_R = e_u \frac{Y_a + Y_0 - \frac{b_c}{2} + \Psi X_a - \Phi(Z_a - Z_0)}{X_a} + u_0 \\ v_R = -e_v \frac{\Phi(Y_a + Y_0 - \frac{b_c}{2}) - \Theta X_a + Z_a - Z_0}{X_a} + v_0 \end{cases} \quad (6.1)$$

$$\begin{cases} u_L = e_u \frac{Y_a + Y_0 + \frac{b_c}{2} + \Psi X_a - \Phi(Z_a - Z_0)}{X_a} + u_0 \\ v_L = -e_v \frac{\Phi(Y_a + Y_0 + \frac{b_c}{2}) - \Theta X_a + Z_a - Z_0}{X_a} + v_0 \end{cases} \quad (6.2)$$

avec : $\Phi = \phi_r + \phi_v + \phi_0$, $\Theta = \theta_r + \theta_v + \theta_0$, ϕ_0 et θ_0 sont les inclinaisons initiales du capteur stéréoscopique selon respectivement les axes \mathbf{Y}_v et \mathbf{X}_v . Ψ est l'angle de cap relatif alors que u_0 et v_0 sont les coordonnées du centre optique dans l'image (ici les deux caméras sont supposées identiques). $e_u = \frac{f_c}{t_u}$ avec, f_c est la longueur de la focale et t_u est la taille des pixels selon \vec{u} . $e_v = \frac{f_c}{t_v}$ avec, t_v est la taille des pixels selon \vec{v} . Z_0 est la hauteur des deux caméras par rapport au plan de la route. b_c est la distance qui sépare les deux caméras.

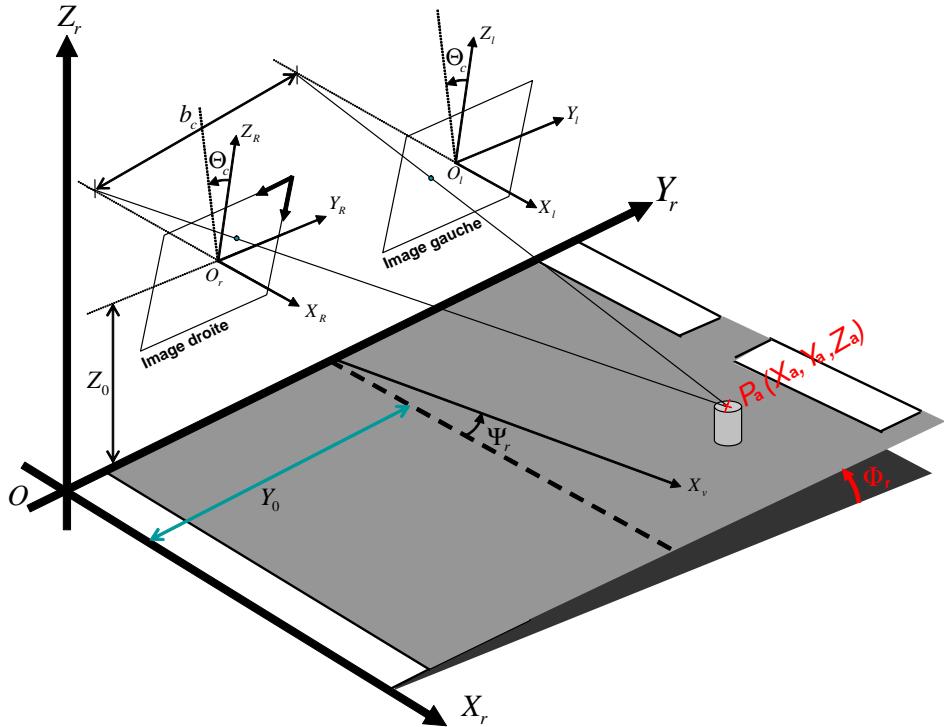


FIG. 6.10 – Perception de l'environnement du véhicule par caméras embarquées

Les coordonnées du point $P_a(X_a, Y_a, Z_a)$ dans le repère relatif au capteur, sont données par :

$$\begin{bmatrix} P_{re} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\Phi_r} R_{\Theta_c} R_{\Psi} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & T_{re \rightarrow a} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{\Phi_r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi_r & \sin \Phi_r \\ 0 & -\sin \Phi_r & \cos \Phi_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{\Theta_c} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_c & 0 & -\sin \Theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Theta_c & 0 & \cos \Theta_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_\Psi = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec, $T_{re \rightarrow a} = [-x_0 \ -y_0 \ -z_0 + \bar{Z}]^T$, \bar{Z} est le pompage du véhicule, x_0, y_0 et z_0 sont les coordonnées dans le repère absolu (\mathbf{R}_a) du centre du capteur .

De même, les coordonnées relatives de $P_a(X_a, Y_a, Z_a)$ en fonction des deux paires (u_R, v_R) et (u_L, v_L) dans le cas d'un faible angle Φ_r sont données par [Ben08, Lab03] :

$$X_{re} = \frac{b_c (e_u \cos(\Theta_c) - (v_R - v_0) \sin(\Theta_c))}{\Delta_u} \quad (6.3)$$

$$Y_{re} = \frac{b_c (u_R - u_0)}{\Delta_u} + \frac{b_c}{2} \quad (6.4)$$

$$Z_{re} = Z_0 + \frac{b_c ((v_R - v_0) \cos(\Theta_c) - e_u \sin(\Theta_c))}{\Delta_u} \quad (6.5)$$

avec $\Delta = u_L - u_R$.

Remarque : Dans l'équation (6.3), les axes de roulis et de tangage sont supposés horizontaux et passant par le centre de gravité du véhicule.

Limite des méthodes de reconstruction de la route par vision artificielle embarquée

L'inconvénient majeur de la reconstruction de la géométrie de la route par vision artificielle embarquée est lié au fait qu'elle permet uniquement une reconstruction dans un repère relatif aux capteurs utilisés. Cela engendre des erreurs très importantes, dans le cas de route non horizontale (route avec dévers et/ou avec pente) et/ou dans le cas de mouvements de la caisse suspendue non nuls. La figure 6.11 montre la reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ dans le repère relatif au capteur stéréoscopique, en fonction de la variation de l'angle $\Theta_c = \theta_r + \theta_v$ et de l'angle de cap Ψ . Les paramètres Y_0 , Z_0 et b_c sont fixés respectivement à 0, 1 et 1.2. La figure 6.12 montre la reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ dans le repère relatif au capteur stéréoscopique, en fonction de la variation de l'angle $\Phi_r = \phi_r + \phi_v$ et de l'angle de cap Ψ . Les paramètres Y_0 , Z_0 et b_c sont restés inchangés. Les résultats des deux figures montrent que la supposition de se limiter uniquement aux inclinaisons initiales ou à une mauvaise estimation de celles-ci, afin de reconstituer le point P_1 dans le repère \mathbf{R}_{re} engendre une erreur non négligeable. Inversement, le passage de repère \mathbf{R}_{re} au repère \mathbf{R}_a par une simple translation est complètement faux.

Donc, l'hypothèse forte, commune aux travaux actuels, d'une inclinaison de capteurs stéréoscopiques fixe selon les différents axes du véhicule ou une mauvaise estimations de ces dernières, engendre des erreurs très importantes comme le montrent les deux tableaux 6.2 et 6.3 respectivement pour les variations de Θ_c et Φ_r , le cap relatif est supposé nul ($\Psi = 0$).

6.4.2 Reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule par stéréovision dans le repère absolu

Notre objectif, dans cette partie, est d'apporter une solution permettant d'intégrer les mouvements de la caisse suspendue dans la reconstruction 3D de la route. On propose une méthode de reconstruction de la géométrie de la route par stéréovision à deux caméras, dans le repère

6.4. Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu

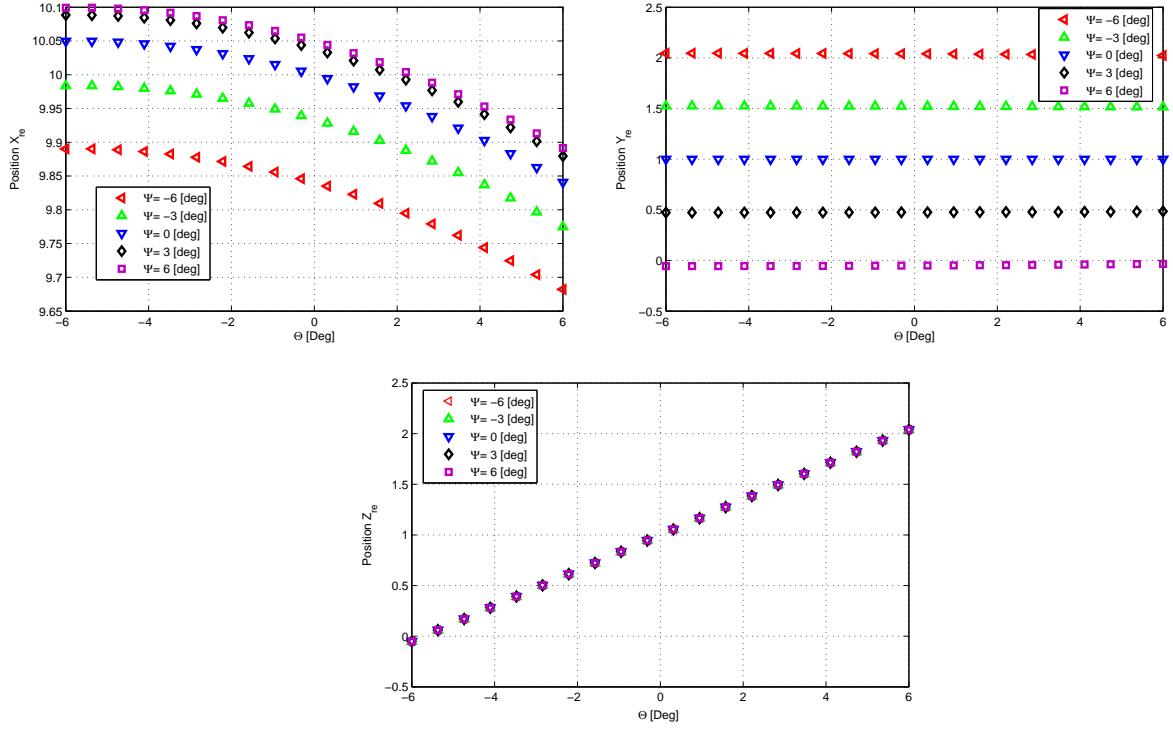


FIG. 6.11 – Reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ en fonction de Θ_c et Ψ dans le repère relatif \mathbf{R}_{re}

TAB. 6.2 – Variations des coordonnées de reconstruction du point P_1 dans le repère relatif en fonction des variations de Θ_c

$\Theta_c(\text{Deg})$	-6.00	-4.00	-2.00	0.00	2.00	4.00	6.00
$\epsilon_{X_{p1}} (\%)$	0.4975	0.4540	0.2881	0.00	0.4099	0.9412	1.5931
$\epsilon_{Y_{p1}} (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\epsilon_{Z_{p1}} (\%)$	105.0763	70.0001	34.9604	0.00	34.8386	69.5129	103.9807

TAB. 6.3 – Variations des coordonnées de reconstruction du point P_1 dans le repère relatif en fonction des variations de Φ_r

$\Phi_r(\text{deg})$	-6.00	-4.00	-2.00	0.00	2.00	4.00	6.00
$\epsilon_{X_{p1}} (\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\epsilon_{Y_{p1}} (\%)$	11.0007	7.2192	3.5509	0.00	3.4290	6.7321	9.9050
$\epsilon_{Z_{p1}} (\%)$	9.9050	6.7321	3.4290	0	3.5509	7.2192	11.0007

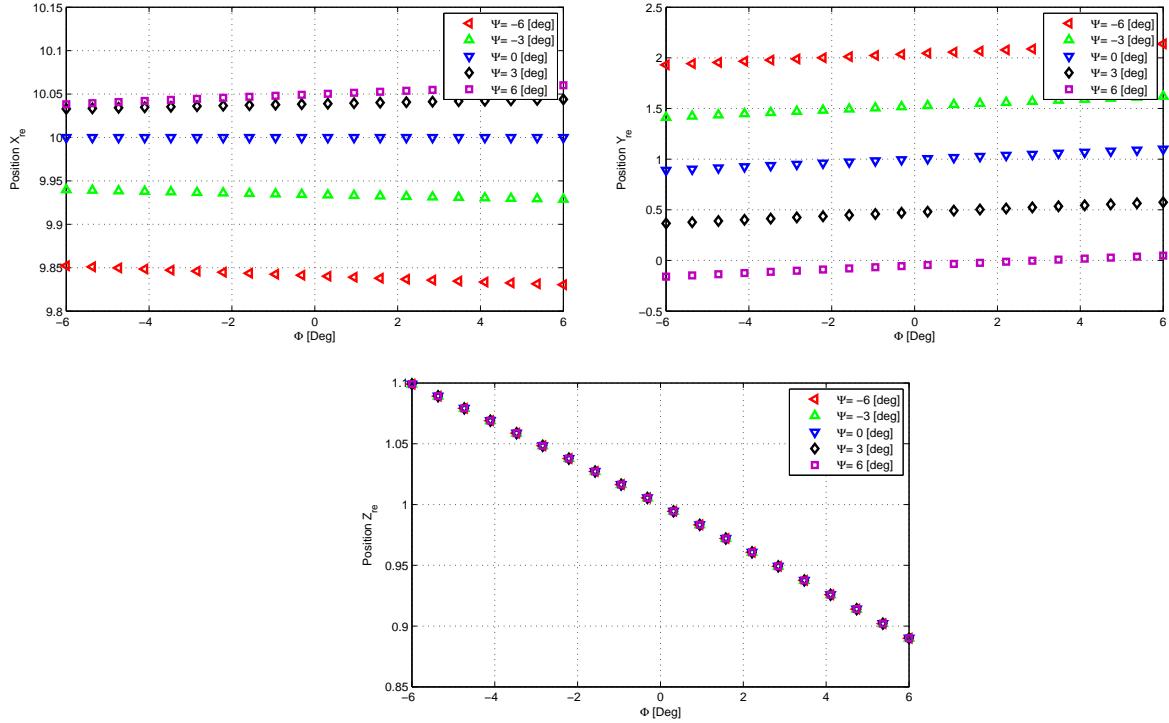


FIG. 6.12 – Reconstruction du point $P_1(10, 1, 1)$ en fonction de Φ_r et Ψ dans le repère relatif \mathbf{R}_{re}

absolu, par fusion des données de reconstruction de la route dans le repère relatif avec les données d'observateurs. Ces données d'observateurs sont utilisées pour calculer à chaque instant la matrice qui assure le passage de repère relatif (repères liés aux capteurs embarqués) au repère absolu.

Variations de la position des capteurs stéréoscopiques

Cette section vise à mettre en évidence les variations de position et d'inclinaison des capteurs stéréoscopique embarqués. Pour cela, on assimile chaque capteur à un point P_c de coordonnées (X_c, Y_c et Z_c) dans le repère caisse \mathbf{R}_c . Ces coordonnées dans le repère absolu sont données par :

$$\begin{aligned} P_a &= R_v^{-1}(\phi_v, \theta_v) R_a^{-1}(\phi_r, \theta_r, \psi_r) P_c \\ P_a &= R_{\theta_v}^{-1} R_{\phi_v}^{-1} R_{\psi_r}^{-1} R_{\theta_r}^{-1} R_{\phi_r}^{-1} P_c \\ P_a &= \Xi(\phi_v, \theta_v, \phi_r, \theta_r, \psi_r) P_c \end{aligned} \quad (6.6)$$

avec

$$P_c = \begin{cases} x_c &= X_0 \\ y_c &= Y_0 \\ z_c &= Z_0 + \bar{Z} \end{cases} \quad (6.7)$$

et X_0 , Y_0 et Z_0 sont les coordonnées initiales du capteur stéréoscopique dans le repère \mathbf{R}_c . \bar{Z} est le pompage du véhicule. $R_v(\phi_v, \theta_v)$ et $R_a(\phi_r, \theta_r, \psi_r)$ sont respectivement la matrice de passage

de repère véhicule (\mathbf{R}_v) au repère caisse (\mathbf{R}_c) et la matrice de passage de repère route (\mathbf{R}_a) au repère véhicule (voir chapitre II pour plus de définitions).

D'après les deux équations 6.6 et 6.7, il est évident que la position des capteurs stéréoscopiques (dans le repère absolu) change en fonction des paramètres de la route et les mouvements de la caisse suspendue.

L'inclinaison des capteurs stéréoscopiques par rapport au repère absolu est donnée par :

$$\Omega_{R_a} = \begin{cases} \Theta_c &= \theta_r + \theta_v + \theta_0 \\ \Phi_r &= \phi_r + \phi_v + \phi_0 \\ \Psi &= \Psi + \psi_0 \end{cases} \quad (6.8)$$

$(\phi_0, \theta_0, \Psi_0)$ est l'inclinaison initiale du capteur stéréoscopique.

Passage du repère absolu au repère image

Soit P_a un point de coordonnées $(X_a, Y_a, Z_a, 1)^T$ dans le repère \mathbf{R}_a , alors ses coordonnées homogènes dans le repère caméra \mathbf{R}_{ca} sont :

$$\begin{bmatrix} P_{ca} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\phi_r} R_{\theta_r} R_{\psi_r} R_{\phi_v} R_{\theta_v} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & -T_{a \rightarrow ca} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a \\ 1 \end{bmatrix}$$

avec

$$T_{a \rightarrow ca} = [X_0 \ Y_0 \ Z_0 + \bar{Z}]^T$$

Pour exprimer totalement les coordonnées du point $P_a(X_a, Y_a, Z_a)$ dans les repères liés aux plans images, il faut effectuer une projection perspective. L'expression de la matrice de projection perspective M_{proj} est :

$$M_{proj} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

u_0 et v_0 sont les projections du centre optique sur le plan image et $\alpha_u = \frac{f}{t_u}$ et $\alpha_v = \frac{f}{t_v}$.
 f : longueur de la focale.

t_u : taille des pixels selon \vec{u} .

t_v : taille des pixels selon \vec{v} .

Cette écriture suppose que les axes du plan image sont perpendiculaires. Cette hypothèse simplificatrice est communément utilisée et est vérifiée sur la plupart des caméras actuelles. Finalement les coordonnées homogènes du point P_a dans le repère image \mathbf{R}_i sont :

$$\begin{bmatrix} P_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\phi_r} R_{\theta_r} R_{\psi_r} R_{\phi_v} R_{\theta_v} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & -T_{a \rightarrow ca} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_i \\ 1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} P_a \\ 1 \end{bmatrix} = (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T$$

Soit en coordonnées usuelles :

$$\begin{cases} u_{i_p} = \frac{X_i}{Z_i} = \frac{D_{11}X_a + D_{12}Y_a + D_{13}Z_a + D_{14}}{D_{31}X_a + D_{32}Y_a + D_{33}Z_a + D_{34}} \\ v_{i_p} = \frac{Y_i}{Z_i} = \frac{D_{21}X_a + D_{22}Y_a + D_{23}Z_a + D_{24}}{D_{31}X_a + D_{32}Y_a + D_{33}Z_a + D_{34}} \end{cases} \quad (6.9)$$

$$[u_{i_p}, v_{i_p}]^T = F_a(X_a, Y_a, Z_a) \quad (6.10)$$

Remarque : À partir des coordonnées $(u_{i_p}^1, v_{i_p}^1), (u_{i_p}^2, v_{i_p}^2) \dots, (u_{i_p}^j, v_{i_p}^j)$, n est le nombre de caméras stéréoscopiques ($j \geq 2$), on peut déterminer les coordonnées X_a, Y_a et Z_a .

$$[X_a, Y_a, Z_a]^T = F_c(u_{i_p}^1, v_{i_p}^1, u_{i_p}^2, v_{i_p}^2 \dots, u_{i_p}^j, v_{i_p}^j) \quad (6.11)$$

Le reste du travail sur la reconstruction de la géométrie de la route par stéréovision est développé par un autre doctorant du LIVIC. Ces travaux sont principalement fondés sur deux modules [Ben07, Ben08, Seb09]. Le premier est un module de détection des bords de la voie de circulation dans chaque image de la paire stéréoscopique. Il utilise un algorithme de reconnaissance guidé par un modèle statistique des bords de voie : l'état initial du modèle est obtenu après une phase d'apprentissage ; l'extraction de primitives dans l'image permet sa mise à jour.

Le modèle prend conjointement en compte les deux caméras stéréoscopiques de telle sorte que sa mise à jour à partir d'une primitive détectée dans l'une des deux images guide la détection des primitives dans l'autre image. Le second module permet la reconstruction 3D et la localisation relative du véhicule par rapport à sa voie de circulation. Les paramètres d'une surface 3D intégrant les profils horizontal et vertical de la voie de circulation sont estimés à partir des bords de voie précédemment détectés. Les figures (6.13), (6.14) et (6.15) montrent quelques résultats obtenus.

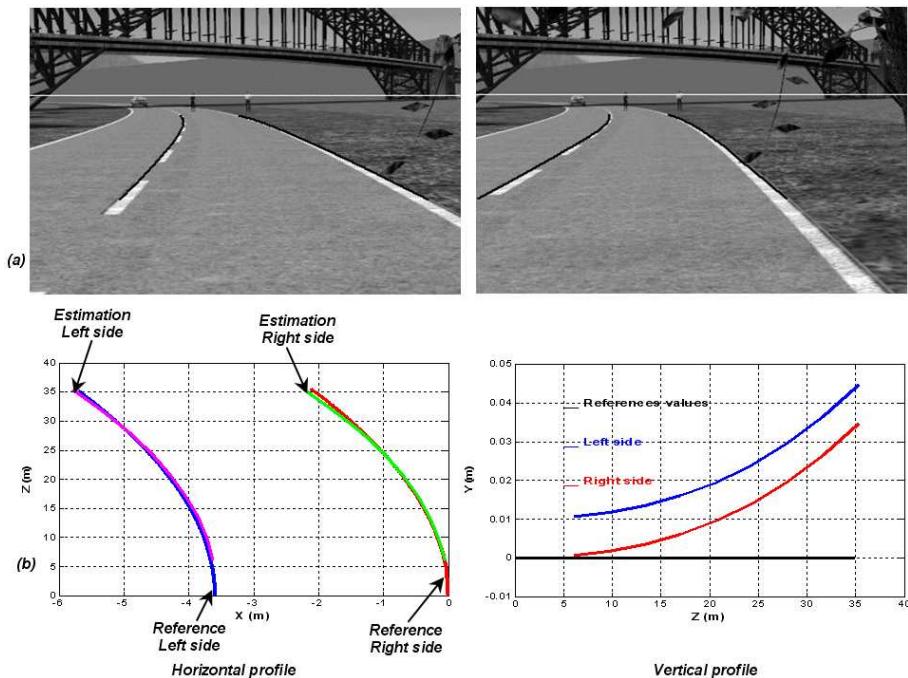


FIG. 6.13 – Résultats de détection et de reconstruction de la route (images de synthèse)

6.4. Estimation 3D de la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu

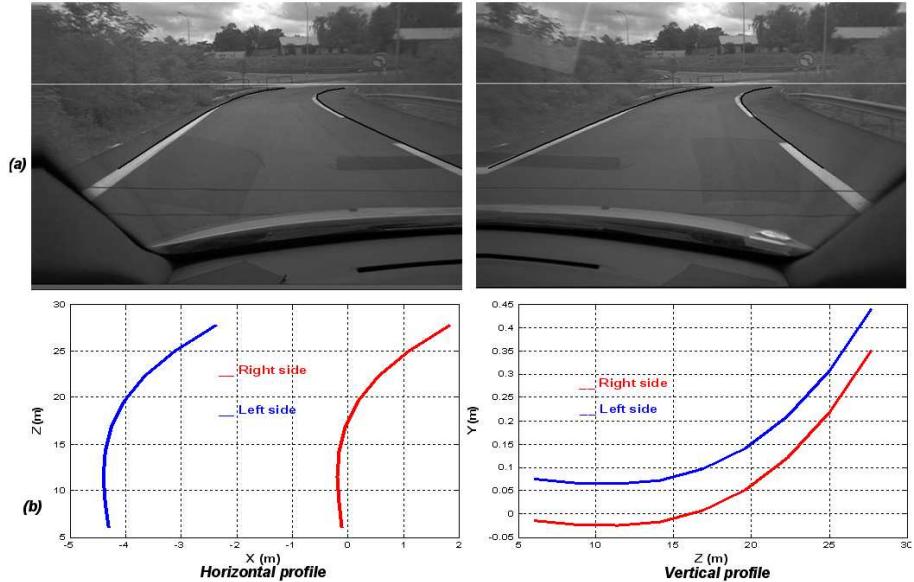


FIG. 6.14 – Résultats de détection et de reconstruction de la route (images réelle-1-)

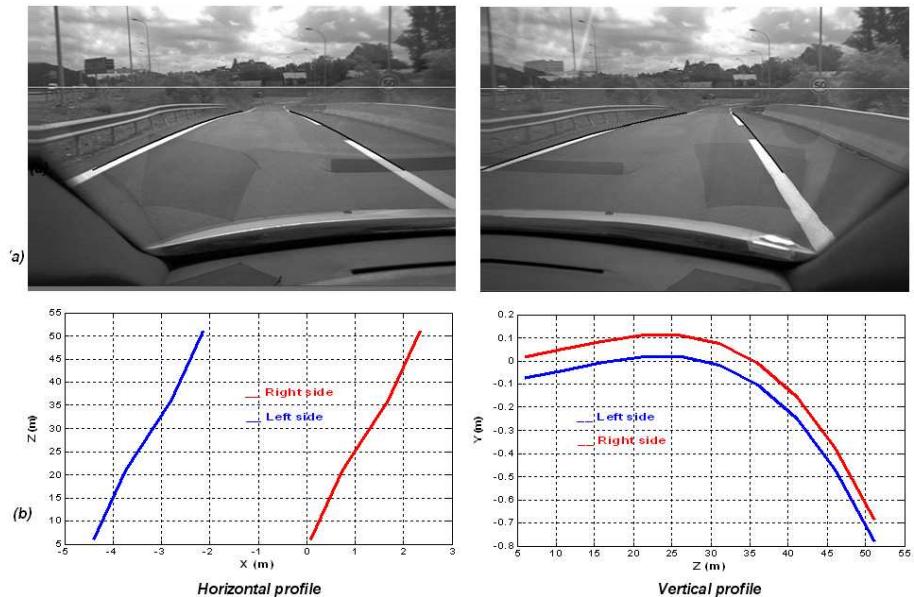


FIG. 6.15 – Résultats de détection et de reconstruction de la route (images réelle-2-)

La Fig. 6.13-a montré le résultat final de la détection de la voie de circulation dans des images stéréoscopiques de synthèse. La Fig. 6.13-b présente le résultat de la reconstruction du profil horizontal et vertical. Les figures 6.14 et 6.15 présentent les résultats de la détection et de la reconstruction de la route obtenus à partir d'images réelles. Les tableaux 6.4 et 6.5, regroupent l'estimation des paramètres dans chaque cas de figure. Les résultats ne sont pas encore validés mais les tests de simulations ont montré que cette méthode de reconstruction de la route est prometteuse.

C_r/C'_r sont respectivement la courbure horizontale de la route et sa dérivée. C_v/C'_v sont respectivement la courbure verticale de la route et sa dérivée.

TAB. 6.4 – Estimation des paramètres de la route (images de synthèse)

Paramètres	Estimation	Référence	Erreurs
$L_r(m)$	3.57	3.6	0.03
$Y_0(m)$	1.75	1.8	0.05
$C_r(m^{-1})$	$-2.9 \cdot 10^{-3}$	$-3.4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$C'_r(m^{-2})$	$-5.3 \cdot 10^{-5}$	$-1.52 \cdot 10^{-6}$	$5.15 \cdot 10^{-5}$
$C_v(m^{-1})$	$2.8 \cdot 10^{-5}$	0	$2.8 \cdot 10^{-5}$
$C'_v(m^{-2})$	$2.2 \cdot 10^{-6}$	0	$2.2 \cdot 10^{-6}$

TAB. 6.5 – Estimation des paramètres de la route des images réelles

Paramètres	Estimation -Fig.6.15-	Estimation -Fig.6.14-
$L_r(m)$	4.2	4.5
$Y_0(m)$	2.31	1.61
$C_r(m^{-1})$	$-8.2 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$
$C'_r(m^{-2})$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$-1.5 \cdot 10^{-4}$
$C_v(m^{-1})$	$-1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
$C'_v(m^{-2})$	$-2.38 \cdot 10^{-4}$	$-1.02 \cdot 10^{-4}$

6.5 Conclusions

Le travail présenté dans ce chapitre, dans la première partie, vise à développer une approche de numérisation et de reconstruction 3D de la géométrie de la route (cartographie numérique), dans un repère absolu supposé galiléen, à faible coût. L'idée générale, consiste à localiser le véhicule en 3D par l'approche IMM puis à faire le recalage pour obtenir celui de centre de la voie et à associer à chaque positionnement les valeurs numériques des différents attributs de la route (pente, devers, largeur, courbure), provenant d'une part de capteurs proprioceptifs et d'autre part d'observateurs (chapitre 5). La largeur de la route est estimée à partir d'images d'une caméra frontale.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons développé une nouvelle approche et les calculs nécessaires pour la reconstruction de la géométrie de la route à l'avant du véhicule par stéréovision à deux caméras identiques, embarquées sur le véhicule. Par la suite nous avons montré les résultats obtenus par cette approche réalisée par un autre doctorant de LIVIC, dans le cas d'images de synthèses et d'images réelles. On donne dans le chapitre suivant les résultats de validation.

Nous avons vu que la caractérisation géométrique tridimensionnelle de la chaussée, présente plusieurs applications relatives à quatre principaux domaines que sont :

- Le développement d'assistances à la conduite comme la localisation absolue du véhicule par rapport à la route, le positionnement en absolu de la route, le développement d'une cartographie en trois dimensions, la connaissance de la géométrie de la route au-delà de la

portée des capteurs, l'amélioration des systèmes d'aide à la conduite existants (la détection d'obstacle, la localisation 2D et 3D, le contrôle latéral et longitudinal, . . .), ou encore la connaissance du réseau routier.

- La construction routière comme la détermination des modes de rectification et de mise en conformité des tracés routiers ou l'identification des zones accidentogènes.
- La dynamique automobile, pour fournir les données d'entrée pour les modèles de simulation du comportement dynamique des véhicules ou de reconstruction cinématique des accidents, ou encore pour les simulateurs physiques de conduite.
- L'optimisation de la consommation en connaissant la pente de la route.

Quatrième partie

**Équipements, Validation Expérimentale
et Conclusions**

Équipements, expérimentation et validation

Sommaire

7.1	Les capteurs utilisés	136
7.1.1	Le codeur d'angle de braquage	136
7.1.2	La centrale inertielle IMU	136
7.1.3	Le Correvit	137
7.1.4	Le GPS RTK	138
7.1.5	Capteurs de vision et de stéréovision	138
7.2	Moyens expérimentaux du LIVIC	139
7.2.1	Les véhicules expérimentaux	139
7.2.2	Les pistes d'essais	140
7.3	Validation des différents observateurs	140
7.3.1	Validation de l'estimateur des variables d'état du véhicule et de la pente de la route	141
7.3.2	Validation de l'estimation du dévers et de la courbure de la route	145
7.3.3	Validation de l'estimation de tangage et de pompage	152
7.3.4	Validation de la reconstruction 3D de la route	152
7.4	Conclusion	154

Afin d'assurer la convergence, la stabilité, la robustesse et la fiabilité des observateurs développés dans le chapitre 5, deux véhicules de type "Peugeot 307" et "Renault Megane" sont équipés par un ensemble de capteurs permettant de réaliser des mesures et des évaluations en ligne. La piste d'essais et de référence, d'une longueur de 5.5 km environ, est située à Versailles-Satory dans la région parisienne.

Le chapitre est scindé en deux parties. Dans la première partie (section 7.1 et 7.2), nous présenterons les différents moyens d'expérimentation du LIVIC, et plus particulièrement les pistes

et les véhicules d'essais ainsi que les caractéristiques de chaque capteur. Dans la seconde partie (section 7.3), nous présenterons les résultats de validation des observateurs développés dans le chapitre 5 et de reconstruction 3D de la géométrie de la route, dans le cas de conduites normale et excessive (fortes sollicitations des dynamiques latérale et longitudinale). Nous terminerons le chapitre par quelques conclusions.

7.1 Les capteurs utilisés

Le véhicule est équipé de plusieurs capteurs de fréquences d'acquisition différentes. Ces derniers sont utilisés soit pour faire fonctionner les observateurs, soit pour valider l'ensemble de ces observateurs ou encore pour l'identification des paramètres statiques et dynamiques du véhicule (annexe B).

7.1.1 Le codeur d'angle de braquage

C'est un capteur optique (Fig. 7.1), caractérisé par une fréquence de 400Hz , il donne indirectement l'angle de braquage des roues avant du véhicule. En effet, ce capteur mesure l'angle au volant qui est ensuite transformé par le biais d'un modèle de la colonne de direction afin d'obtenir l'angle de braquage. Dans notre cas, le rapport entre les deux angles est fixe et égal à 16.



FIG. 7.1 – Capteur d'angle de braquage (codeur optique)

7.1.2 La centrale inertie IMU

La centrale inertie (IMU) utilisée est une GV-400 (Fig. 7.2), fabriquée par Grossbow. Caractérisée par une fréquence d'acquisition supérieure à 60 Hz . Elle est composée de trois gyroscopes MEMS silicium de grande bande passante ($\pm 100\text{ }(\text{°}/\text{sec})$), d'une résolution $\leq 0.1^\circ$, et de trois accéléromètres de la gamme $\pm 2g$ et d'un biais $\leq 8.5\text{ mg}$ chacun. Elle est également équipée d'un capteur de température intégré. La centrale IMU est placée au niveau du centre de gravité du véhicule et orientée selon les trois axes. Par conséquent, elle fournit directement

les accélérations du véhicule et les vitesses de rotation autour de chaque axe (le mouvement rotationnel de la terre est supposé négligeable).



FIG. 7.2 – La centrale inertielle IMU

7.1.3 Le Correvit

Le capteur Correvit, présenté sur la figure 7.3 avec son boîtier de conditionnement de signal, est un capteur de déplacement optique donc sans contact avec le support. La surface du sol étudiée a un diamètre d'environ 3 à 4 cm. Le capteur analyse les variations des fréquences spatiales produites par le mouvement de la micro-structure de la route. Les signaux sont ensuite conditionnés pour donner les vitesses dans les deux directions (longitudinale et transversale) et donc l'angle de dérive. Il est caractérisé par une fréquence de 150 Hz et une erreur selon les axes longitudinal et latéral inférieur à 0.01 m/s. Les mesures se font à l'aplomb du capteur, une translation des données vers le centre de gravité du véhicule est donc nécessaire.



FIG. 7.3 – Le capteur Correvit

7.1.4 Le GPS RTK

Le système GPS-RTK²⁰, est de marque Thalès SAGITTA 02 et d'une précision centrimétrique. Il permet une localisation 3D temps réel et est caractérisé par une fréquence de 10 Hz pour les données brutes et 20 Hz pour les données calculées. La figure 7.4 montre l'antenne et le boîtier du système.

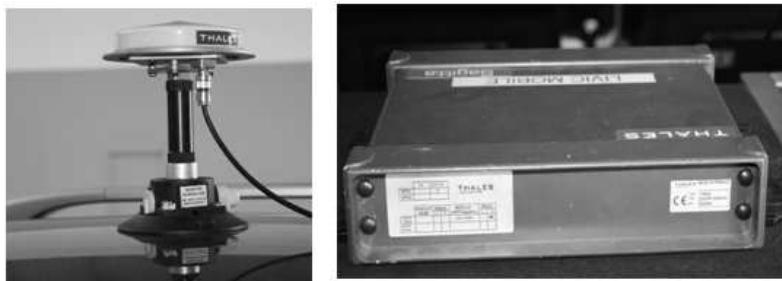


FIG. 7.4 – Le système GPS-RTK

7.1.5 Capteurs de vision et de stéréovision

La figure 7.5 présente la caméra CCD, elle est utilisable de jour comme de nuit. Cette caméra fournit une image avec une échelle de gris sur 8 bits et une résolution de 752(H) × 582(V) pixels. Sa fréquence est de 25 images par seconde.



FIG. 7.5 – Le capteur de vision (caméra)

Remarque : En plus de des capteurs cités ci-dessus, les données de l'ABS sont directement accessibles sur le bus CAN. Le système ABS fournit les vitesses angulaires des quatre roues en rad/sec avec une fréquence supérieure 50Hz. Malheureusement, les données de l'ABS de la "Peugeot 307", sont caractérisées par une résolution médiocre (erreur relative supérieure à 0.06).

²⁰GPS-RTK : Global Positioning System Real Time Kinetic

7.2 Moyens expérimentaux du LIVIC

Le Laboratoire LIVIC dispose de moyens d'essais importants. Ces moyens peuvent être regroupés en deux catégories (véhicules expérimentaux et pistes d'essais).

7.2.1 Les véhicules expérimentaux

La figure 7.6 montre les deux véhicules utilisés pour l'acquisition des données et pour les tests (Fig. 7.6-a et Fig. 7.6-c). Ils équipés de l'ensemble des capteurs précédemment présentés. Les figures Fig. 7.6-b et Fig. 7.6-d montrent l'informatique embarquée. L'ensemble est alimenté par une batterie supplémentaire afin de garantir une indépendance et une suffisance en énergie à chaque instant, quel que soit le mode de fonctionnement du véhicule, y compris à l'arrêt.

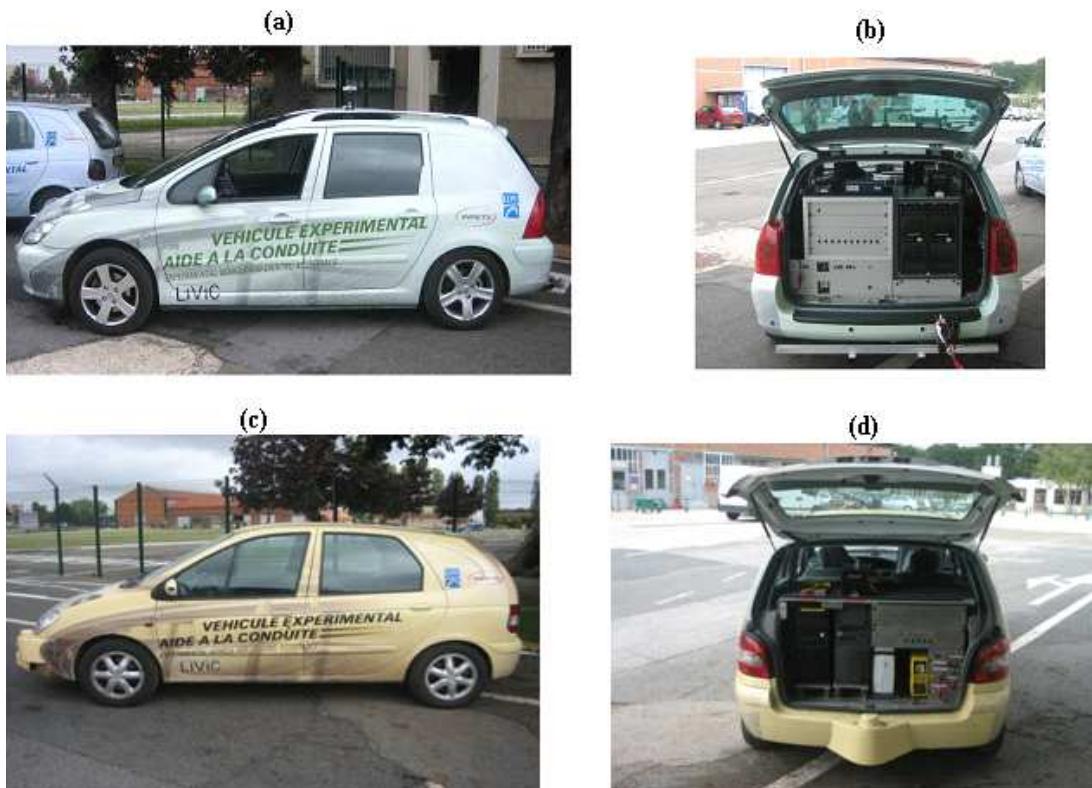


FIG. 7.6 – Véhicules expérimentaux

Les PC embarqués sur les deux véhicules sont utilisés pour le traitement d'images et les contrôles longitudinal et latéral. Ils servent également à enregistrer les données pour l'évaluation *a posteriori*. Chacun de ces PC est équipé de 2 processeurs AMD Opteron 2.2 GHz et de 1GO de mémoire vice. L'ensemble des programmes utilisés fonctionnent sous le logiciel RTMaps développé par la société Intempora. Ce logiciel permet l'acquisition de données issues de différentes sources (ports série, bus CAN, vidéo, etc.), leur horodatage, leur enregistrement et leur rejet. Les modules de traitement d'images et de commande, développés en C++, sont intégrés à RTMaps grâce à un environnement de développement intégré au logiciel Microsoft Visual Studio.

7.2.2 Les pistes d'essais

Les pistes d'essais, situées à Versailles-Satory, sont d'une longueur supérieure à 5.5 km. Leur revêtement est de trois types : en majeure partie en bitumineux standard, le reste est de type pavé ou béton armé. Les coordonnées des bords droits et gauches des pistes sont connues avec une précision centimétrique. On distingue trois pistes indépendantes.

La première est sous forme d'un circuit fermé d'une longueur de 3.4 km environ, présentant une typologie de route départementale, avec des rayons variant de 30 m à plus de 600 m. Le circuit est caractérisé par 14 virages, auxquels sont associés des dévers plus au moins importants ($\pm 10^\circ$) (voir figure 7.7) et d'une pente quasi-nulle ($\pm 2.5^\circ$). Ce circuit est très adapté aux dynamiques du véhicule latérale et mixte. Le GPS est disponible en mode centimétrique sur la plus grande partie.

La deuxième piste, dite "piste de vitesse" est constituée de deux grandes lignes droites, longue de 2.2 km environ et sans dénivelé, et d'un virage à très grand rayon et se finit par un rond point (voir Fig. 7.8). Elle a la typologie d'une autoroute. Elle est utilisée essentiellement pour des tests d'accélération et freinage (dynamique longitudinale uniquement) ou de vision.

La troisième piste (nommée le val d'or) est aussi un circuit fermé localisé en forêt, caractérisé par une pente très importante et des virages à faible rayon de courbure (Fig. 7.9). Sur la majeure partie du circuit, le GPS-RTK en mode centimétrique n'est pas disponible, du fait du masquage des arbres. Le GPS classique est quant à lui toujours disponible.

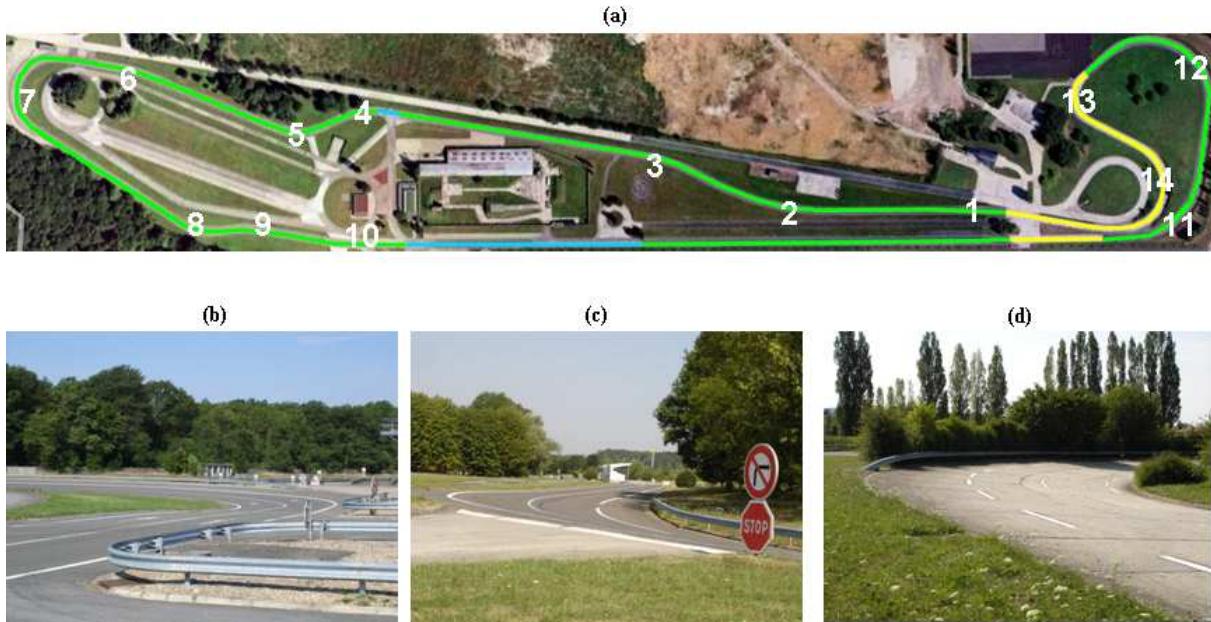


FIG. 7.7 – Piste "La routière" : vue globale sur la piste (a) quelques virages et dévers correspondants ((b),(c) et (d))

7.3 Validation des différents observateurs

Dans cette section, on procède à la validation de tous les observateurs présentés dans le chapitre 5, par comparaison entre les variables d'état estimées et les signaux obtenus par les capteurs. Les attributs de la route seront comparés avec les références. On se limite à présenter

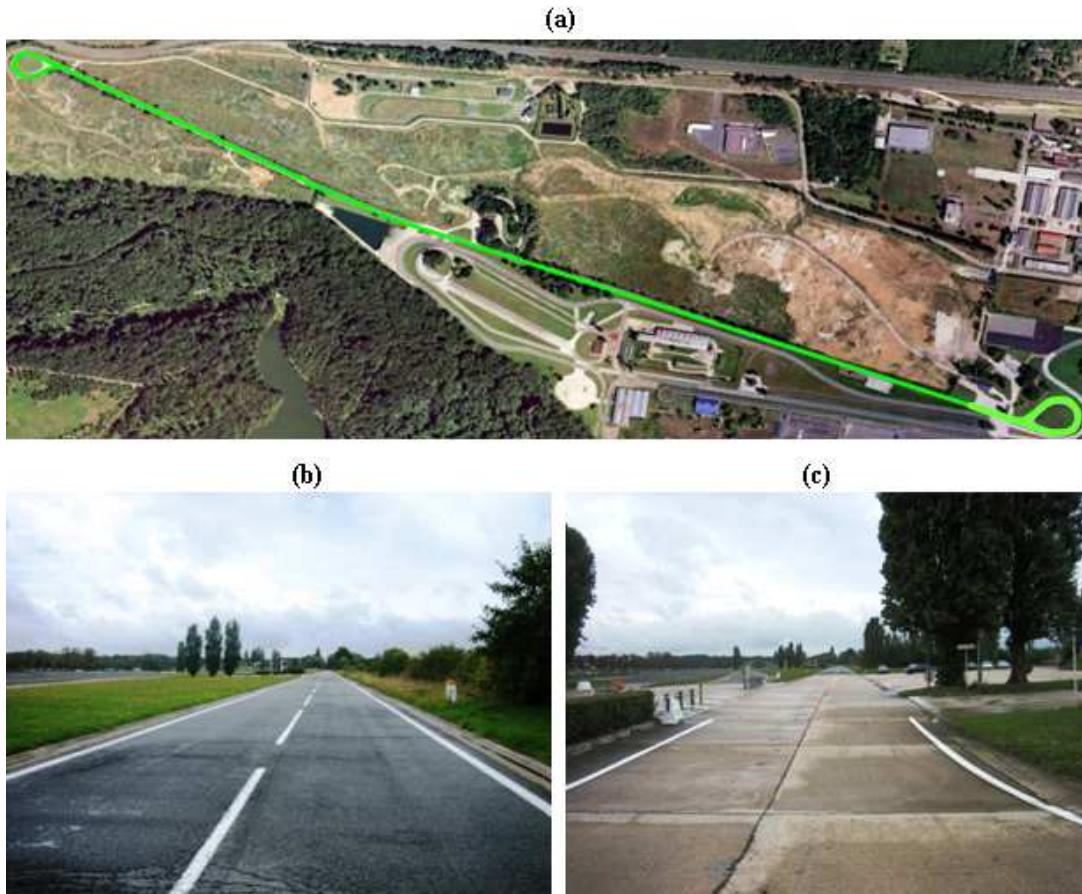


FIG. 7.8 – Piste de vitesse

un seul scénario de validation pour chaque observateur.

Signalons que nous avons réalisé plusieurs tests de validation sur des pistes autre que celles de Versailles en collaboration avec l'INRETS-MA dans le cadre du projet SARK.

7.3.1 Validation de l'estimateur des variables d'état du véhicule et de la pente de la route

Dans un premier temps, le modèle non linéaire du véhicule à quatre roues a été validé sur la base des mesures issues du véhicule prototype (Renault Mégane). Par la suite, le filtre de Kalman étendu et l'observateur de Luenberger ont été appliqués sur des mesures obtenues lors de tests expérimentaux, sur le circuit de "Val d'or", le mieux adapté pour solliciter les dynamiques longitudinale et verticale. L'ensemble des capteurs utilisés sont : le codeur optique d'angle de braquage et la centrale inertie (la vitesse de lacet et les deux accélérations longitudinale et latérale du véhicule ($\dot{\psi}$, γ_x et γ_y)) et les données du système ABS. Pour la validation, on utilise aussi les données GPS et Correvit, afin de localiser et d'accéder simultanément aux vitesses latérale et longitudinale. Les résultats issus de ces tests sont visibles sur les figures qui suivent. Une première comparaison est faite entre les grandeurs simulées et les grandeurs estimées :

La Fig. 7.10 montre les entrées du modèle et de l'estimateur EKF, respectivement, l'angle de braquage (a), un zoom sur les vitesses angulaires des quatre roues et les accélérations longi-

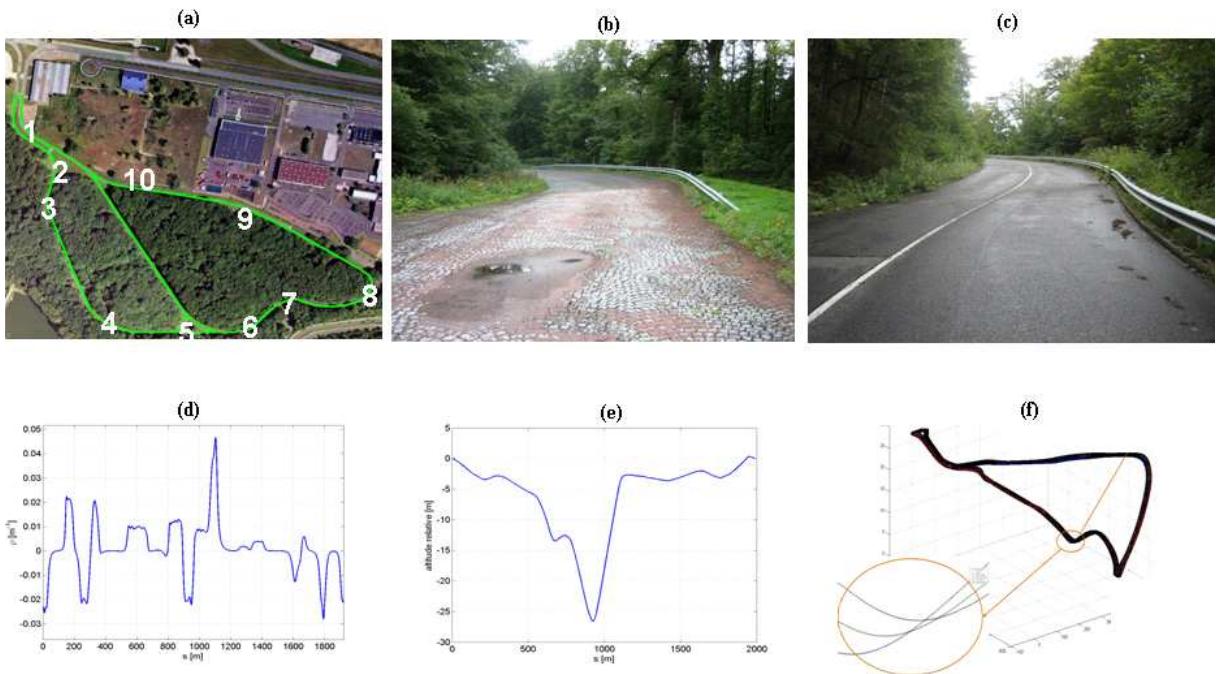


FIG. 7.9 – Piste “Le Val d’or” : (a) montre une vue globale sur la piste, (b) et (c) montrent le type de revêtement, (d) montre la courbure du circuit extérieur, (e) et (f) montrent respectivement l’altitude et la géométrie 3D de la piste

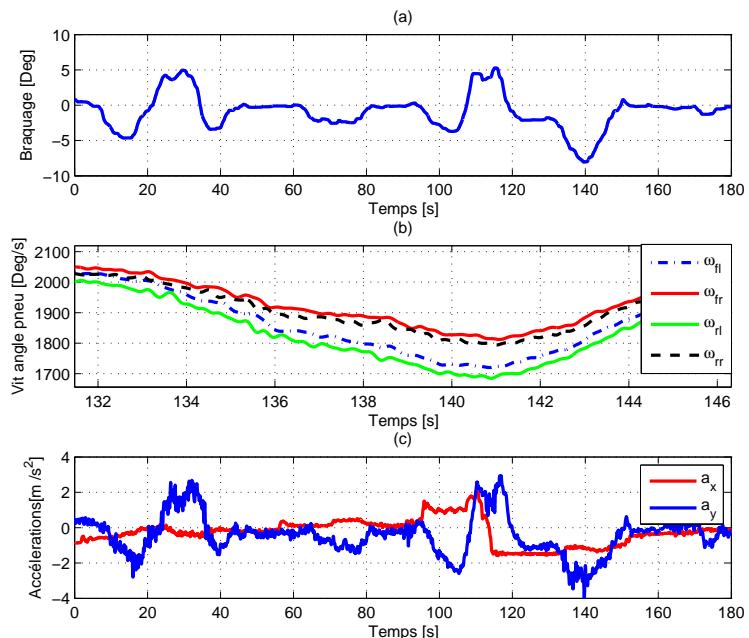


FIG. 7.10 – Angle de braquage (a), vitesses angulaires des pneumatiques (b) et les accélérations longitudinale et latérale (c)

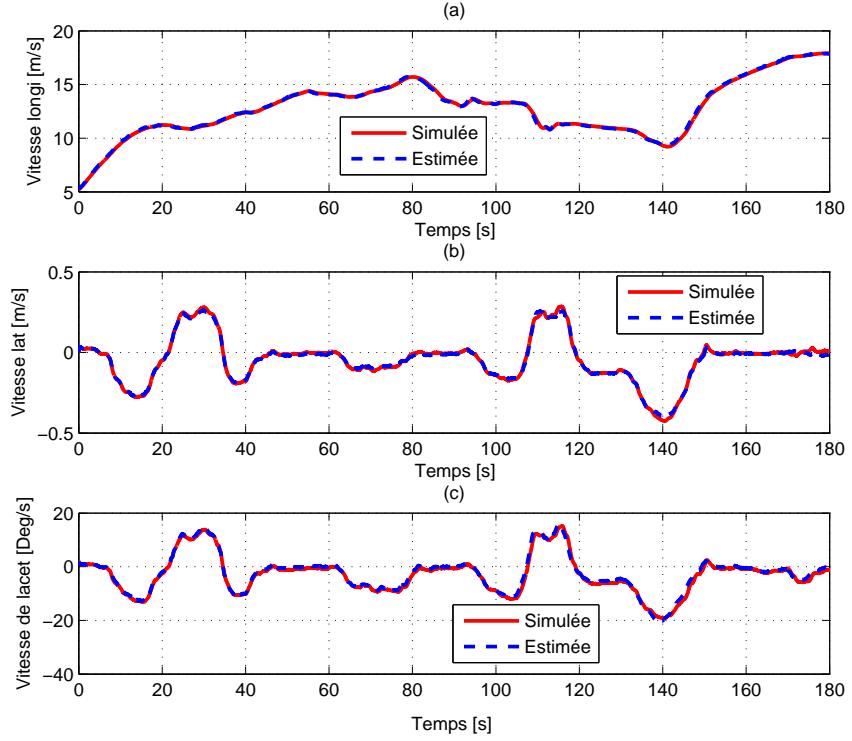


FIG. 7.11 – Variables d'état simulées (trait continu) et estimées (trait discontinu)

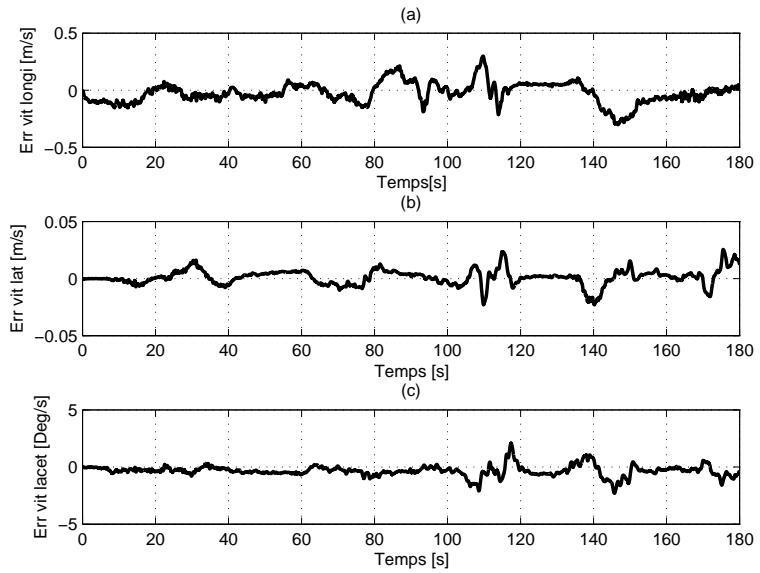


FIG. 7.12 – Erreurs d'estimation des variables d'état

tudinale et latérale. La figure 7.11 montre les grandeurs simulées et estimées pour : la vitesse longitudinale (a), la vitesse latérale (b) et la vitesse de lacet (c). Les courbes démontrent que

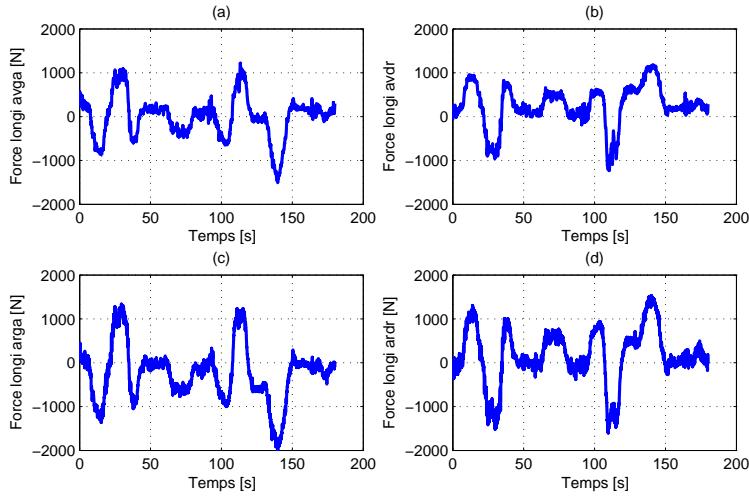


FIG. 7.13 – Résultats d'estimation des forces longitudinales

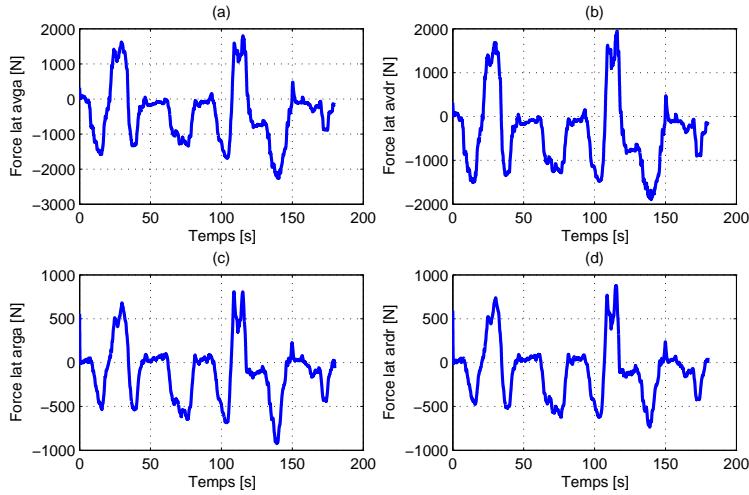


FIG. 7.14 – Résultats d'estimation des forces latérales

les variables d'état estimées suivent parfaitement celles simulées. Les erreurs d'estimation de ces variables d'état sont visibles sur la Fig. 7.12. En moyenne, ces erreurs sont de 1.24%, 1.78% et 2.15% respectivement pour les vitesses longitudinale, latérale et de lacet. Les figures 7.13, Fig. 7.14 et Fig. 7.15 donnent respectivement les résultats d'estimation des forces longitudinales (F_{x_i}), latérales (F_{y_i}) et normales (F_{n_i}). Ces forces n'ont pas été comparées avec les signaux réels parce que l'équipement du véhicule nous ne le permet pas.

Les variables estimées sont maintenant comparées aux mesures. Les résultats sont donnés sur les Fig. 7.16 et Fig. 7.17. La figure 7.16 montre une comparaison entre les vitesses de lacet estimées et mesurées par la centrale inertie (a) et la vitesse longitudinale du véhicule estimée par le filtre de Kalman étendu avec celle mesurée par le capteur Correvit (b). Malgré une très faible erreur d'estimation pour ces deux variables, on ne peut rien conclure sur la stabilité et la convergence de l'estimateur puisque ces deux variables (vitesse longitudinale et vitesse de lacet) font partie des entrées de l'estimateur. La figure 7.17 montre une comparaison entre la vitesse latérale estimée

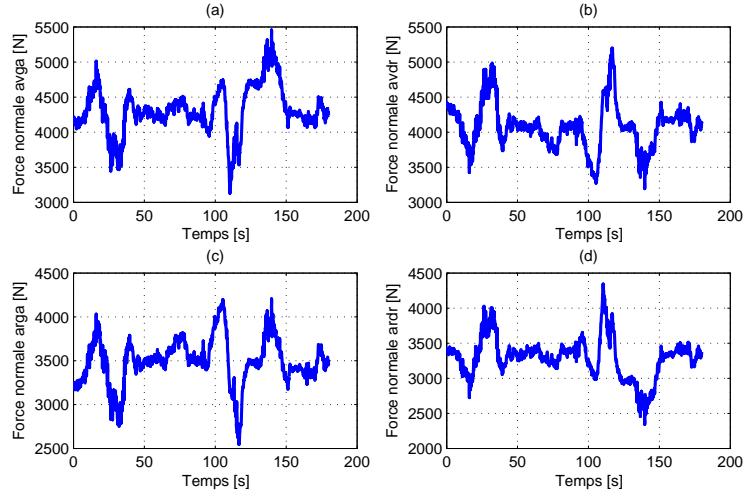


FIG. 7.15 – Résultats d'estimation des forces normales

et celle mesurée par le capteur Correvit (courbes en haut), et une comparaison entre l'angle de dérive estimé et celui donné par le même capteur (courbes du bas). Ces résultats sont concluants puisque les erreurs d'estimation sont très faibles, malgré une forte sollicitation des dynamiques longitudinale et latérale comme le montre la figure 7.18 (courbes des forces longitudinales en fonction des glissements longitudinaux). En effet, la figure 7.18 donne un aperçu sur la dynamique longitudinale du véhicule, on voit bien que cette dynamique évolue dans la zone de linéarité et de glissement, notamment pour les deux pneumatiques droits (ces deux pneumatiques sont le plus souvent à l'extérieur du virage).

La courbe de reconstruction de la pente, obtenue par application de l'observateur de Luenberger sur le modèle longitudinal du véhicule est visible sur la Fig. 7.19, elle suit bien celle de la pente réelle obtenue par cartographie numérique, entre $t = 115s$ et $t = 125s$ la pente varie très fortement, elle passe de -6° à 8° et l'observateur suit d'une manière fidèle cette variation. La figure 7.20 montre la vitesse longitudinale du véhicule estimée par le même observateur (OL) comparée à celle donnée par le capteur Correvit.

La bonne estimation des variables d'état et de reconstruction de la pente de la route confirme bien l'adéquation des modèles et des observateurs.

Remarque : *Les différences entre les deux courbes de pente estimée et de référence, ne sont pas toutes dues aux erreurs d'estimation elles sont aussi dues au cap du véhicule. En effet, la comparaison idéale nécessiterait un cap nul, or cela est loin d'être le cas, notamment dans les virages. Ceci engendre une différence de $\theta_{rr} \sin \Psi$. θ_{rr} étant la pente de référence et Ψ le cap relatif.*

7.3.2 Validation de l'estimation du dévers et de la courbure de la route

Cet observateur est testé sur des données collectées par le véhicule "Peugeot 307" sur la piste "la routière". Le véhicule est équipé des capteurs suivants : le Correvit, l'IMU, GPS-RTK, le codeur d'angle de braquage et une caméra CCD. La vitesse du véhicule est considérée comme étant la moyenne des deux vitesses de translation des deux roues arrière, qui sont les moins soumises aux glissements. Ces vitesses sont récupérées des données de système ABS.

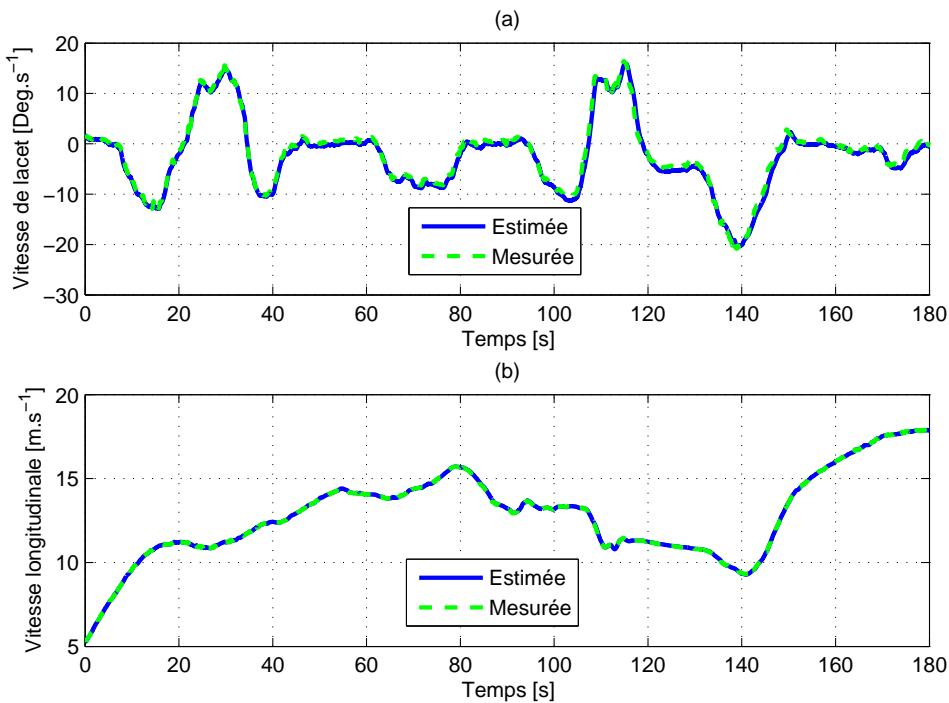


FIG. 7.16 – Vitesses longitudinale et de lacet simulées (trait continu) et estimées (trait discontinu)

Comme la vitesse longitudinale du véhicule est considérée dans le modèle bicyclette (voir chapitre II) comme un paramètre variable, l'observateur correspondant devient linéaire à paramètres variants (LPV). Afin de réduire le temps de calcul et d'éviter la synthèse des LMI pour chaque valeur de vitesse, nous avons défini cinq intervalles de vitesse pour lesquels le gain de observateur PI peut être considéré comme constant et que la matrice $[\bar{A} - \bar{LC}]$ reste Hurwitz sur chaque intervalle. Le paramètre γ qui minimise l'influence des entrées inconnues sur l'estimation des variables d'état est également calculé pour chaque intervalle. Le paramètre λ qui assure une convergence rapide de l'observateur est fixé à 25.

Dans le but de déterminer ces intervalles de vitesse, tout en garantissant la stabilité du système, nous avons tracé la variation des valeurs propres du gain ($[\bar{A} - \bar{LC}]$) en fonction de la vitesse du véhicule. Les intervalles de vitesse sont choisis de telle sorte que le gain de l'observateur reste une matrice Hurwitz sur le même intervalle et que les variations des valeurs propres soient négligées. Cela nous a conduit à choisir cinq intervalles. Les valeurs propres correspondantes sont visibles sur la figure 7.21.

L'angle de braquage appliqué sur les deux pneumatiques avant, relevé sur le codeur optique est visible sur la figure 7.22, il est compris entre -7° et $+5^\circ$. Le véhicule se déplace avec une vitesse moyenne de 18 m/s (64.5 km/h). Les résultats d'estimation des variables d'état sont visibles sur les Fig. 7.23-a, Fig. 7.23-b et Fig. 7.24.

La figure 7.23-a montre la vitesse de lacet mesurée par la centrale inertielle et celle estimée par l'observateur PI. La figure 7.23-b compare les vitesses de roulis estimée et mesurée par l'IMU. Le résultat de l'estimation de l'angle de dérive est visible sur la figure 7.24, il est comparé avec

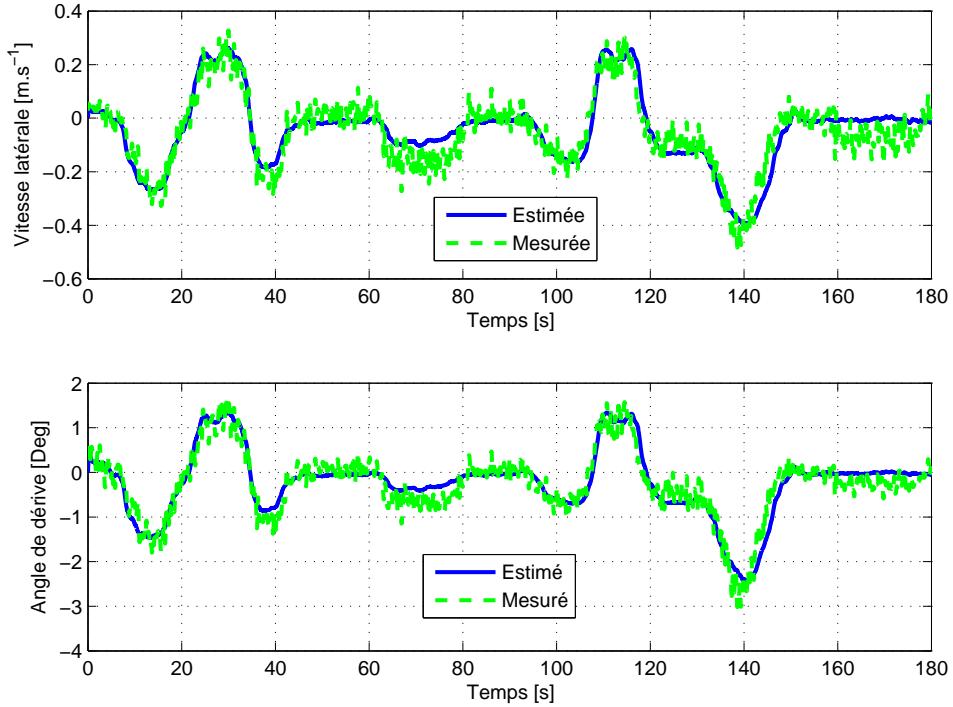


FIG. 7.17 – Vitesse latérale et angle de dérive simulés (trait continu) et estimés (trait discontinu)

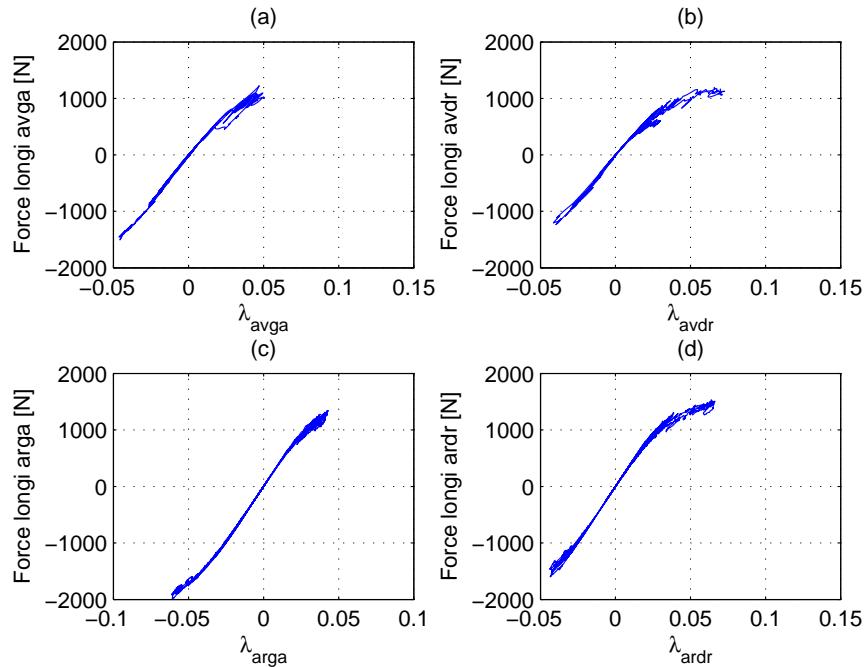


FIG. 7.18 – Variation des forces longitudinales en fonction des glissements longitudinaux

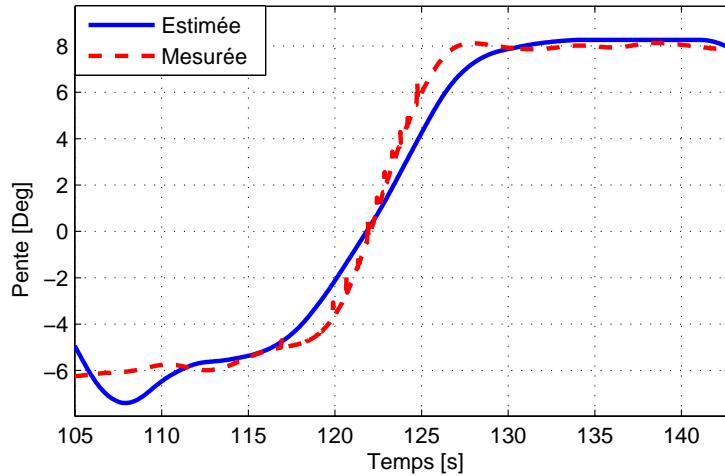


FIG. 7.19 – Résultat d'estimation de la pente (trait continu) et la pente de référence (trait discontinu)

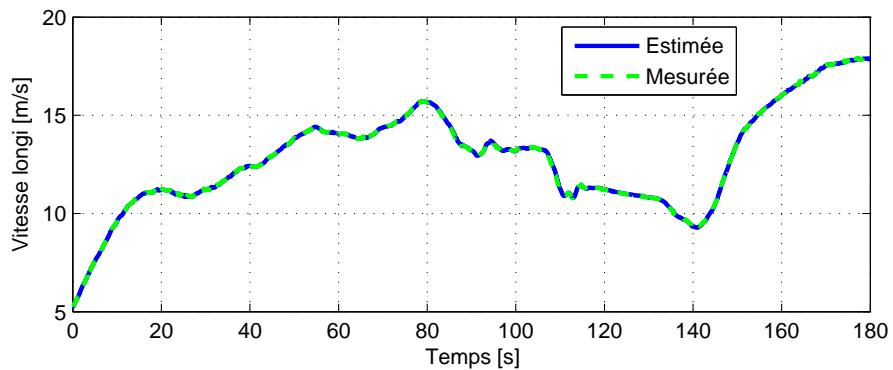


FIG. 7.20 – Vitesse longitudinale estimée par l'observateur de Luenberger (trait continu) et mesurée (trait discontinu)

l'angle de dérive donné par le capteur Correvit. Les erreurs d'estimation sont visibles sur la figure 7.25.

La figure 7.26-a montre l'estimation de l'angle de roulis. Cette variable n'est pas comparée avec la mesure car l'équipement du véhicule ne le permet pas. La figure 7.26-b montre deux courbes correspondant à l'angle de devers estimé par l'observateur PI (trait continu) et l'angle de devers de référence (trait discontinu). On conclut que l'estimation suit bien la référence et l'erreur est d'environ 2° au maximum. Donc on peut dire que le dévers de la route est correctement reconstruit.

Remarque : Comme précédemment, les différences entre les deux courbes de dévers estimé et de référence ne sont pas toutes dues aux erreurs d'estimation, elle sont aussi dues au cap du véhicule. En effet, un cap relatif Ψ engendre une erreur d'ordre $\epsilon = \phi_{rr} \sin(\Psi)$. ϕ_{rr} est le devers de référence.

Finalement le résultat d'estimation de la courbure de la route obtenue par l'application de l'observateur proportionnel intégral sur le modèle bicyclette augmenté (système 5.15), est visible

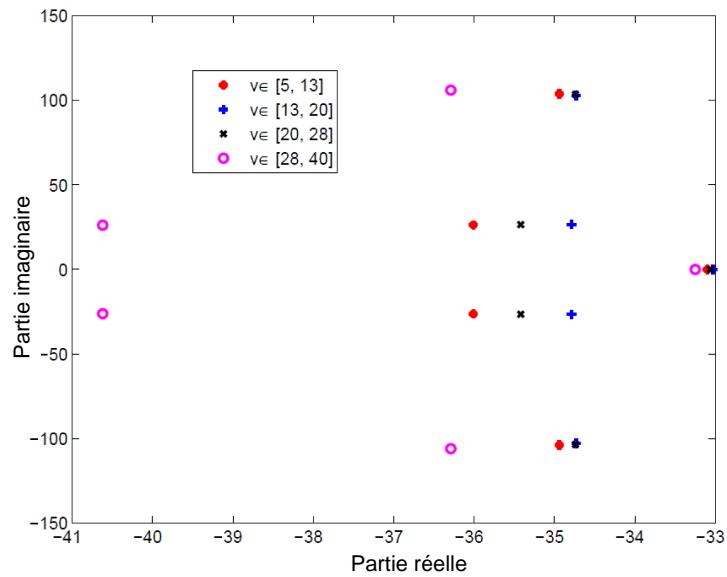


FIG. 7.21 – Valeurs propres de l'observateur PI en fonction de la vitesse du véhicule

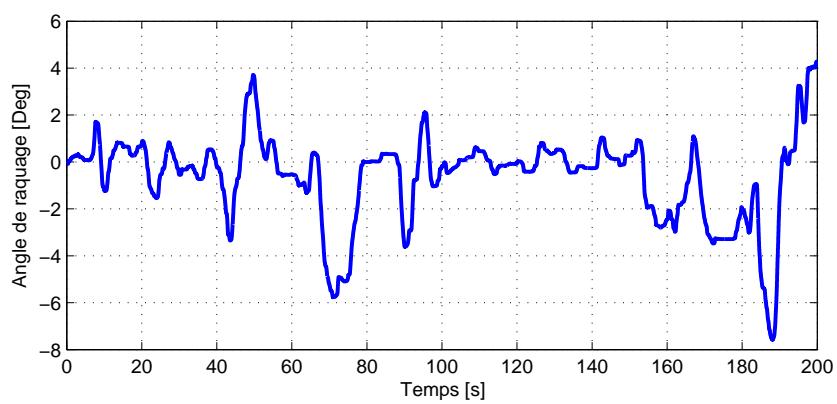


FIG. 7.22 – Angle de braquage

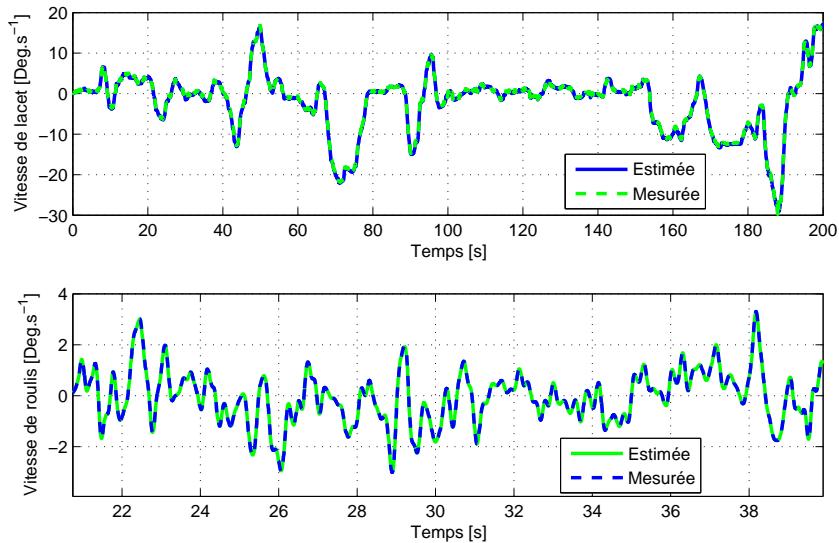


FIG. 7.23 – Vitesses de lacet et de roulis estimées (trait continu) et mesurées (trait discontinu)

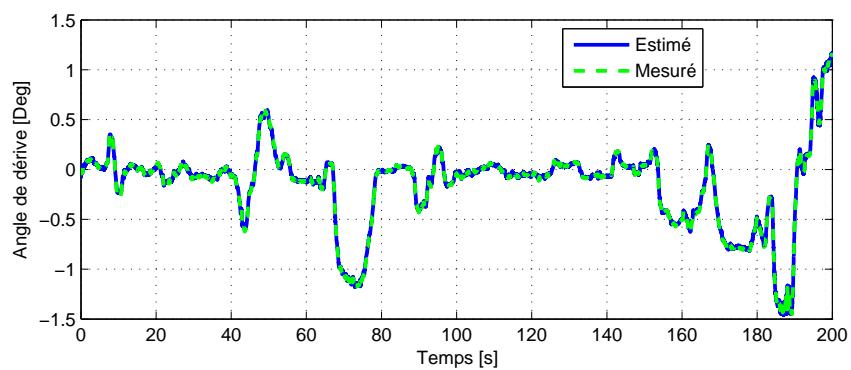


FIG. 7.24 – Angle de dérive estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)

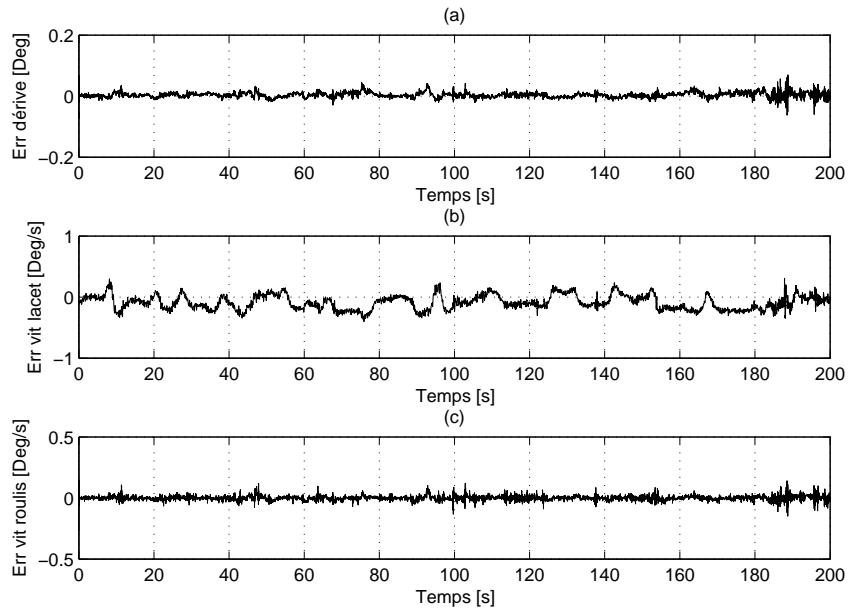


FIG. 7.25 – Erreur d'estimations des variables d'état du modèle bicyclette

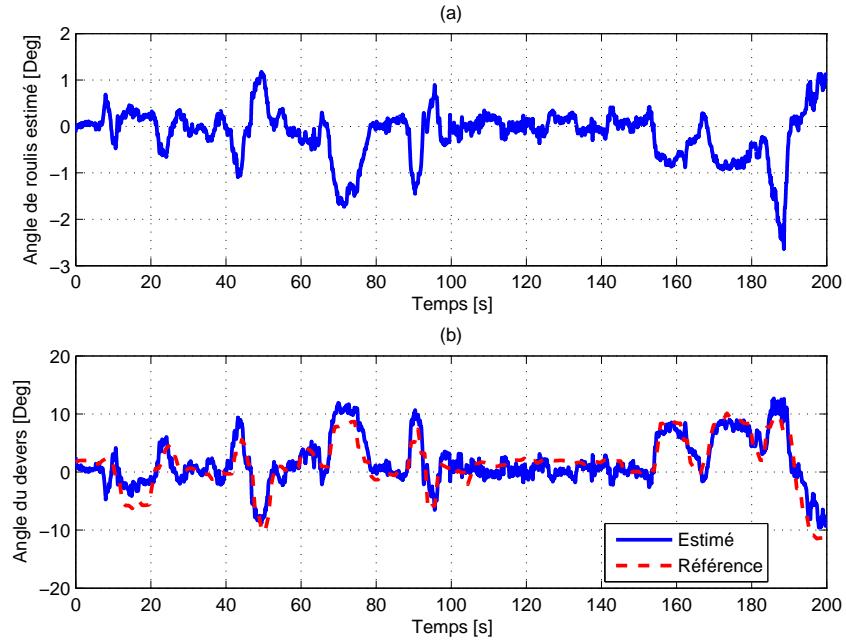


FIG. 7.26 – Roulis du véhicule (a) et dévers de la route (b) estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)

sur la figure 7.27 (trait continu) ; elle est comparée avec celle calculée à partir des données de la stéréovision (trait discontinu). Les erreurs d'estimation sont très faibles et la vitesse de convergence de l'observateur est assez rapide. Rappelons qu'ici, on considère que le capteur de vision fournit l'angle de cap relatif Ψ . L'algorithme d'estimation de la courbure par stéréovision a été développé au LIVIC.

Toutes ces figures confirment que l'observateur PI est capable d'estimer avec précision les variables d'état du modèle bicyclette, la courbure et le dévers de la route.

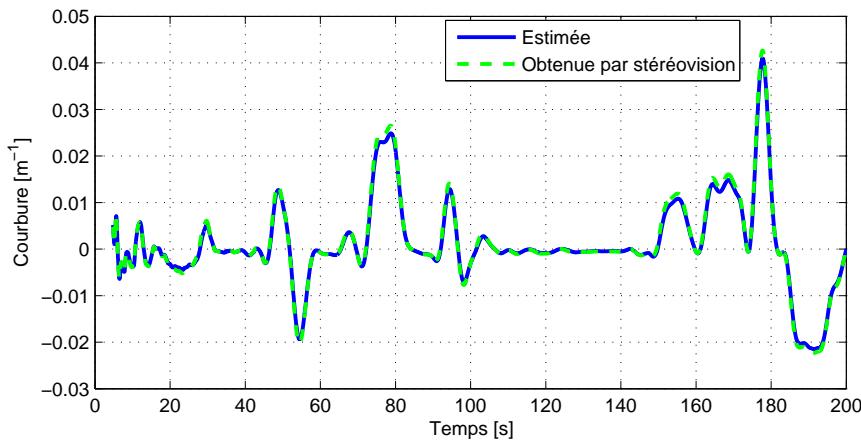


FIG. 7.27 – Courbure de la route estimée (trait continu) et calculée (trait discontinu)

7.3.3 Validation de l'estimation de tangage et de pompage

Les tests sont réalisés sur le premier circuit ("la routière"), le véhicule des tests est équipé de deux télémètres montés sur les extrémités de la carrosserie, l'un à l'avant et l'autre à l'arrière, de manière à mesurer la distance au sol, cela permet de calculer facilement l'angle de tangage (la route est supposée plane). Pendant les tests, la vitesse du véhicule varie entre 2 m/s et 20 m/s, les accélérations entre $-0.6g$ et $0.5g$.

La figure 7.28 montre l'angle de braquage (a), les vitesses de roulis (b), de tangage (c) et de lacet (d) mesurées par la centrale inertuelle. Ces variables sont ensuite appliquées à l'observateur LPV. Les Fig. 7.29-a, Fig. 7.29-b et Fig. 7.29-c montrent respectivement le résultat d'estimation du roulis, du pompage et du tangage du véhicule. L'équipement ne nous permet pas de comparer les deux premières courbes (roulis et pompage) avec les signaux réels. La courbe de tangage estimé par l'application de l'observateur LPV sur le modèle du véhicule est comparée avec celle obtenue à partir des mesures des deux télémètres, l'erreur d'estimation est négligeable (2.4% en moyenne) et le résultat est satisfaisant.

7.3.4 Validation de la reconstruction 3D de la route

On montre dans cette partie le résultat de la reconstruction de la géométrie de la route en trois dimensions. A chaque point du centre de la voie, on associe les valeurs numériques des attributs (pente, devers, courbure et largeur) correspondantes. Le résultat obtenu est visible sur

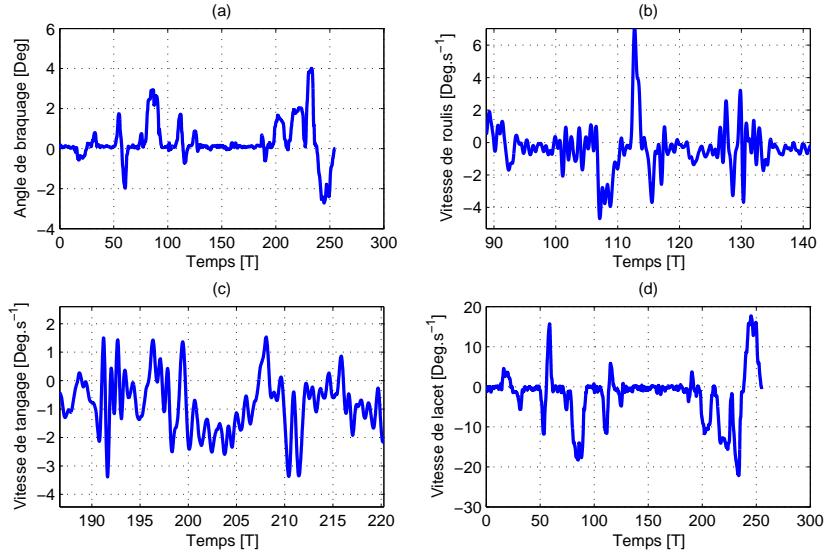


FIG. 7.28 – Angle de braquage (a) vitesse de roulis (b), vitesse de tangage (c) et vitesse de lacet (d)

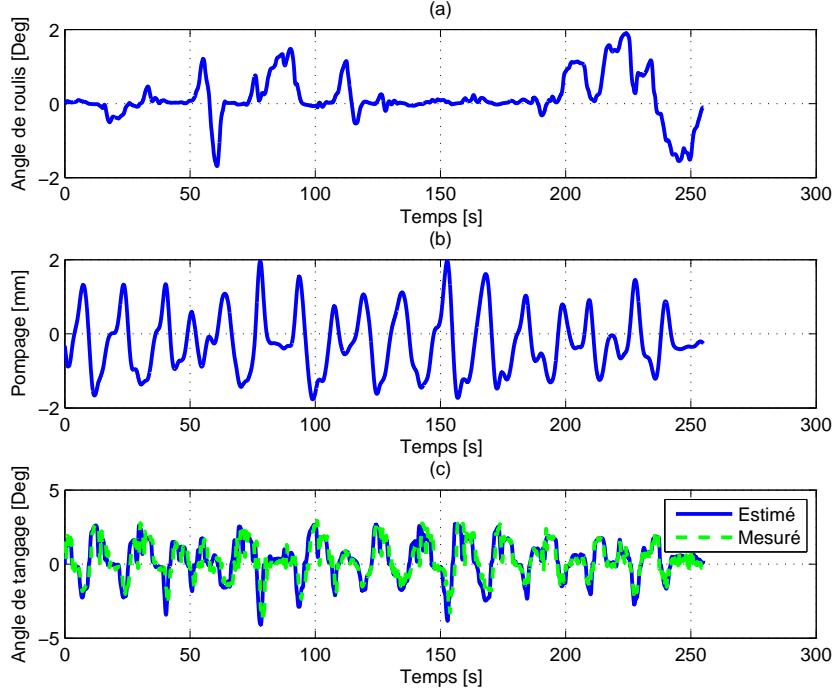


FIG. 7.29 – Résultats d'estimation de l'angle de roulis (a), du pompage (b) et l'angle de tangage (c) estimé (trait continu) et mesuré (trait discontinu)

la figure 7.30 et est comparé avec la référence. Dans notre cas, la localisation du véhicule est obtenue par fusion des données GPS-RTK et avec celles de l'estimateur IMM afin de se concentrer uniquement sur les erreurs de reconstruction des paramètres de la route. Les zones les plus larges de la piste correspondent à des dévers plus importants. Logiquement ces zones sont situées dans les virages les plus importants.

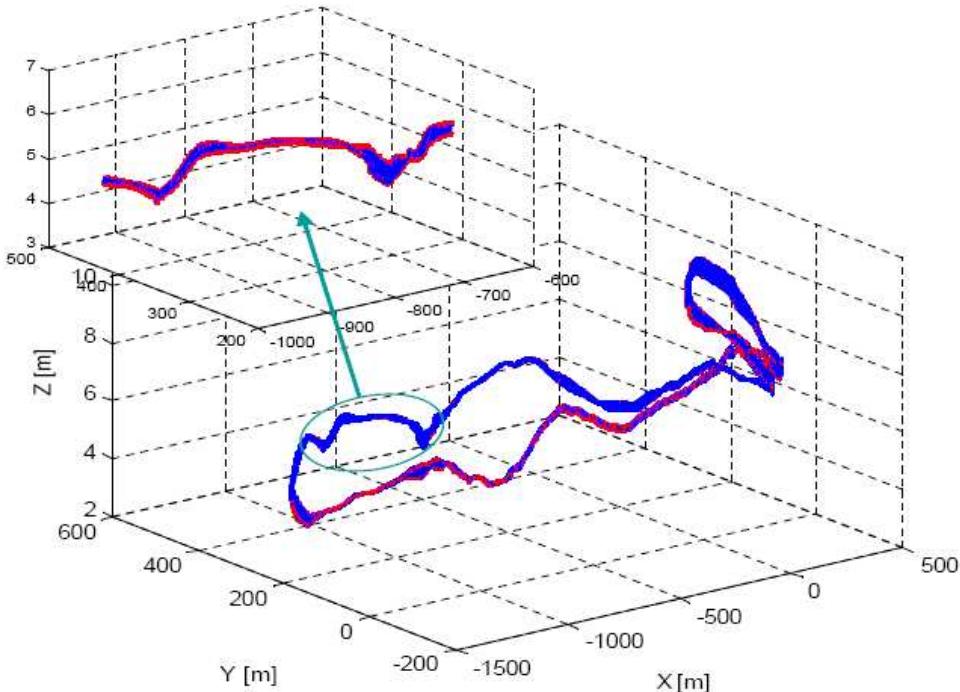


FIG. 7.30 – Résultat de reconstruction de la géométrie de la route

La figure 7.31 montre le résultat de reconstruction des bords gauche et droit de la route par stéréovision dans le repère image. On conclut que le résultat est satisfaisant. La figure 7.32-a et 7.32-b montrent respectivement le résultat de reconstruction de la géométrie de la route dans le repère relatif (\mathbf{R}_{re}) et le résultat de reconstruction dans le repère absolu (\mathbf{R}_{a}). Ces résultats n'ont pas été comparés avec les données de référence mais à "vue d'oeil", on peut conclure que les résultats de reconstruction dans le repère (\mathbf{R}_{a}) sont plus significatifs par rapport aux résultats de reconstruction dans le repère relatif.

7.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des expériences menées au cours de la thèse.

Dans une première partie, nous avons développé les caractéristiques des différents capteurs utilisés et nous avons illustré l'équipement expérimental du LIVIC, notamment les pistes et les véhicules expérimentaux.

Dans une deuxième partie, nous avons utilisé des données expérimentales pour la validation des observateurs développés au cours des travaux de thèse. Parfois, nous ne disposons pas suffisamment d'observations (mesures) pour procéder à toutes les validations notamment pour les



FIG. 7.31 – Résultats de détection des bords gauche et droit de la route - image 7.1- par stéréovision)

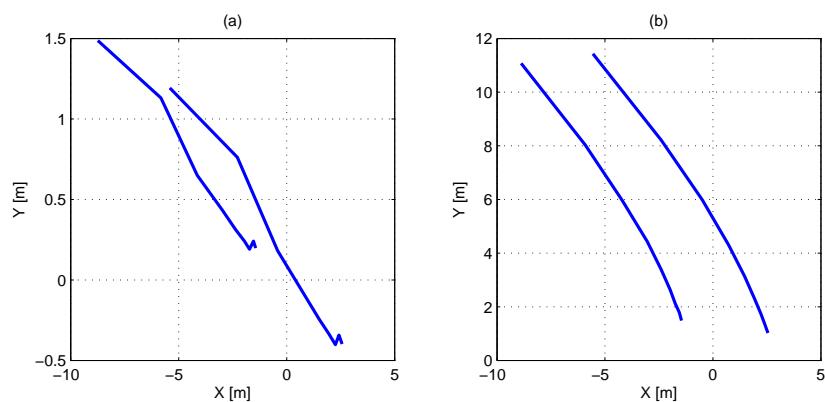


FIG. 7.32 – Résultats de reconstruction des bords gauche et droit de la route (image 7.1) par stéréovision dans le repère relatif (a) et dans le repère absolu (b)

forces du contact pneumatique-chaussée. Enfin, pour les variables d'état validées, nous avons vu que les erreurs d'estimation sont faibles que la méthode de reconstruction de la géométrie de la route, à très faible coût, aboutit à des résultats très corrects et qui pourraient tout à fait être exploitées par les différents champs d'applications cités dans ce chapitre.

Conclusions Générale et Perspectives

Conclusions et perspectives

Conclusions

Dans ce mémoire, nous avons proposé deux méthodes de reconstruction 3D de la géométrie de la route dans le repère absolu. La première méthode consiste à localiser le centre de la voie et d'associer à chaque point localisé les différentes valeurs numériques des attributs de la route (pente, dévers, courbure et largeur) obtenus à l'aide d'observateurs. La deuxième méthode estime la surface de la route par stéréovision dans le repère relatif au capteur stéréoscopique, dans un premier temps, le résultat est multiplié par la matrice de passage du repère relatif au repère absolu pour obtenir la géométrie de la route dans le repère absolu, dans un deuxième temps. La matrice de passage est en fonction de la géométrie de la route au niveau du véhicule et les mouvements de la caisse suspendue (roulis, tangage et pompage). Elle est calculée pour chaque paire d'images stéréoscopiques.

Les travaux de reconstruction de la géométrie de la roue ont été présentés dans les quatre parties constitutives de ce document :

- Introduction, motivations et état de l'art ;
- Modélisation du véhicule et de la géométrie de la route ;
- Observateurs pour l'estimation des variables d'état du véhicule et les attributs de la route et reconstruction 3D de la chaussée ;
- Équipements, validation expérimentale et conclusions.

La première partie a ainsi porté sur la présentation du contexte et les objectifs de ces travaux de thèse. Après une bref étude de l'accidentologie, nous avons présenté un état de l'art relativement exhaustif des systèmes intelligents de transport et les travaux de reconstruction de la surface de la chaussée en 2D et en 3D.

La deuxième partie est constituée des chapitres II et III). Le premier a d'abord présenté une modélisation cinématique et dynamique détaillée du véhicule. L'objectif n'était pas de faire une analyse et une étude très approfondie des modèles ni de leurs paramètres dynamiques. Néanmoins cette partie est un passage obligatoire pour la conception d'observateurs. Nous avons, en particulier, présenté les mouvements de la caisse, les glissements longitudinaux et transversaux et les forces extérieures agissant sur le véhicule (forces de contact pneumatique chaussée, forces aérodynamiques, forces normales, force de résistance aux roulements.etc). Ce chapitre a présenté aussi les principaux modèles simplifiés du véhicule ainsi que leurs domaines de validité. Ces modèles simplifiés sont : le modèle non linéaire à quatre roues, le modèle linéaire type bicyclette et le modèle verticale de la suspension. La fin du chapitre est consacrée à l'illustration des résultats de validation du modèle dynamique et la présentation des étapes d'identification des paramètres du véhicule.

Le deuxième chapitre de cette partie (Chapitre III) est orienté vers la description de l'infrastructure, nous avons détaillé les principaux attributs : la pente, le dévers, la courbure, la largeur et l'uni.

La troisième partie a été consacrée au développement d'observateurs pour la reconstruction de la géométrie de la route. Elle a traité dans un premier temps les notions d'observabilité et de conception d'observateurs pour les modèles linéaires et non linéaires, dans le cas continu et discret. Nous avons détaillé en particulier le filtre de Kalman, l'observateur PI à entrées inconnues et les conditions de stabilité et de convergence des observateurs en cascade. Dans un deuxième temps, plusieurs observateurs ont été développés pour l'estimation des attributs de la route (la pente est reconstituée par application du filtre de Kalman étendu sur le modèle non linéaire du véhicule. Le devers et la courbure sont estimés par application de l'observateur PI à entrées inconnues sur le modèle bicyclette) et les mouvements de la caisse suspendue (le roulis est obtenu par application de l'observateur PI sur le modèle bicyclette. Le tangage et le pompage sont estimés par une approche multi-modèles, multi-observateurs).

Dans un deuxième temps, plusieurs observateurs sont développés pour l'estimation des variables d'état du véhicule et les attributs de la route. Les vitesses longitudinale et latérale, les forces de contact pneumatique chaussée, les forces normales et les glissements longitudinaux et latéraux... sont estimés par application du filtre de Kalman étendu sur le modèle non-linéaire du véhicule. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et l'erreur d'estimation pour les variables validées est très acceptable. La pente de la route est estimée par application d'un observateur de type Luenberger sur le modèle longitudinal du véhicule. Les forces du contact pneumatique-chaussée estimées par le premier estimateur sont considérées comme une entrée de cet observateur. Le résultat d'estimation de la pente est comparé avec la pente de référence. Cette comparaison a montré que la méthode proposée est concluante. Le devers et la courbure de la route sont estimés par application de l'observateur PI à entrées inconnues sur le modèle bicyclette, le braquage des pneus avant est considéré comme une entrée connue du modèle, le devers comme un défaut de modélisation et les forces du vent comme une entrée inconnue. Les estimations fournies par cet observateur ont toutes été comparées aux signaux réels obtenus par des capteurs implantés sur le véhicule expérimental. Les mouvements de la caisse suspendue sont estimés comme suit : le roulis est obtenu par application de l'observateur PI sur le modèle bicyclette. Le tangage et le pompage sont estimés par une approche multi-modèles, multi-observateurs (le modèle et l'observateur sont sélectionnés en fonction de la vitesse de lacet et l'accélération longitudinale du véhicule).

Par la suite, deux approches de reconstruction de la géométrie de la route ont été présentées. La première vise à localiser le véhicule, puis à faire le recalage pour obtenir coordonnées du centre de la voie afin d'associer pour chaque point les valeurs des différents attributs de la route et ainsi former un tableau numérique de la route. Quant à la deuxième approche, elle vise à estimer la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère relatif au capteur stéréoscopique. Le résultat est multiplié par la matrice de passage du repère relatif au repère absolu pour reconstruire la géométrie de la route à l'avant du véhicule dans le repère absolu.
Nous avons vu qu'afin d'estimer ces attributs de la route et de développer les deux approches, l'estimation des variables d'état du véhicule et des forces de contact pneumatique-chaussée était indispensable. Les résultats d'estimation de ces forces et ces variables d'état du véhicule ont été présentés tout au long de cette partie.

La quatrième partie a été dédiée à un exposé général de l'instrumentation des véhicules expérimentaux utilisés et à validation des observateurs de la pente, du dévers, de la courbure et de la première approche de reconstruction de la géométrie de la route. Les résultats obtenus étaient très concluants.

À partir des résultats obtenus dans cette thèse, nous avons défini un ensemble d'applications, dont quelques sont déjà en développement. On peut citer :

- Le développement d'assistances à la conduite :
 - Localisation absolue du véhicule par rapport à la route.
 - Positionnement en absolu de la route.
 - Développement d'une cartographie en trois dimensions (3D) ;
 - Connaissance de la géométrie de la route au-delà de la portée des capteurs.
 - Amélioration des systèmes d'aide à la conduite existants tels que : la détection d'obstacle, la localisation 2D et 3D, le contrôle latéral et longitudinal, développement d'alertes....
 - Connaissance du réseau routier.
- La construction routière :
 - Détermination des modes de rectification et de mise en conformité des tracés routiers.
 - Identification des zones accidentogènes par rapport à la géométrie de l'infrastructure.
- La dynamique automobile en fournissant les données d'entrée (assiette instantanée du véhicule) :
 - Pour les modèles de simulation du comportement dynamique des véhicules.
 - Pour les modèles utilisés en reconstruction cinématique des accidents.
 - Pour les simulateurs physiques de conduite.
- L'optimisation de la consommation par connaissance de la pente de la route.

Perspectives

Le travail présenté dans cette thèse est loin d'être achevé, comme perspectives de continuité on propose :

- La validation de la deuxième approche par comparaison entre le résultat de reconstruction de la géométrie de la route et sa référence.
- La mise en évidence d'autres types d'applications potentielles afin de démontrer les gains de la reconstruction de la géométrie de la chaussée ; tels que : l'identification de zones accidentogènes, le développement d'alertes à l'approche d'un virage, la détection des défauts de construction de route, l'optimisation de la consommation...
- L'intégration de l'adhérence et de l'uni dans le tableau numérique de la reconstruction de la géométrie de la route.

A

Observabilité du modèle non linéaire du véhicule

L'analyse de l'observabilité du système (2.52), nécessite le calcul de la matrice d'observabilité donnée par l'équation (4.6) (voir la section 4.2.2 sur l'observabilité des systèmes non-linéaires) :

$$\pi(x_{nl}, u_{nl}) = \begin{bmatrix} y_{nl} \\ \dot{y}_{nl} \\ \ddot{y}_{nl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{nl_1} \\ y_{nl_2} \\ \dot{y}_{nl_1} \\ \dot{y}_{nl_2} \\ \ddot{y}_{nl_1} \\ \ddot{y}_{nl_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ \dot{\psi} \\ \dot{V}_x \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{V}_x \\ \vdots \end{bmatrix} = O_{obs}(x_{nl}, u_{nl}) \quad (\text{A.1})$$

Nous disposons de six équations non linéaires pour trois variables d'état. Donc trois d'entre elles peuvent être sélectionnées de manière appropriée pour prouver la réversibilité unique de la matrice d'observabilité $O_{obs}(x_{nl}, u_{nl})$:

$$\begin{bmatrix} y_{nl_1} \\ y_{nl_2} \\ \dot{y}_{nl_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ \dot{\psi} \\ g_{21}(u_{nl})V_y + g_{20}(u_{nl}, y_{nl}) \end{bmatrix} = O_{obs,r}(x_{nl}, u_{nl}) \quad (\text{A.2})$$

Les termes $g_{21}(u_{nl})$ et $g_{20}(u_{nl}, y_{nl})$ de l'équation (A.2) sont issus de la troisième équation du système d'état (équation 2.44) :

$$\ddot{\psi} = \beta \cdot g_{21}(u_{nl}) + g_{20}(u_{nl}, y_{nl}) \quad (\text{A.3})$$

Le système (A.2) admet une transformée unique sous la forme suivante :

$$x_{nl} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{nl_1} \\ \frac{\dot{y}_{nl_2} - g_{20}(u_{nl}, y_{nl})}{g_{21}(u_{nl})} \\ y_{nl_2} \end{bmatrix} = O_{obs,r}^{-1}(u_{nl}, y_{nl}) \quad (\text{A.4})$$

Si $g_{21}(u_{nl})$ est non nul (véhicule non neutre, sous-vireur ou sur-vireur), alors l'inverse de la matrice d'observabilité ($O_{obs,r}^{-1}(u_{nl}, y_{nl})$) existe et est unique. Le système (2.52) est alors globalement observable.

B

Identification des paramètres du véhicule

L'étude de la stabilité, de la convergence ou le développement d'une loi de commande ou d'un estimateur nécessitent la connaissance des paramètres du système dynamique étudié. Ainsi, il est indispensable de déterminer les paramètres statiques (longueur, angles, masses, volumes... etc.) et les paramètres dynamiques. Ces derniers sont souvent estimés par un observateur ou directement mesurés par des capteurs, ou alors en ayant recours à des méthodes d'identification en ligne.

Cette annexe a pour but de présenter des méthodes d'identification des paramètres dynamiques utilisant les propriétés de linéarité du modèle dynamique et d'identifier les paramètres du véhicule.

B.1 Principe de l'identification des paramètres statiques et dynamiques

B.1.1 Mise en équation

Le plus souvent dans la littérature, les méthodes d'identification (moindres carrés, filtre de Kalman, PEM, observateurs) des paramètres d'un modèle donné nécessitent une mise en équation de ce modèle. Ce modèle est constitué de variables d'entrée, de variables de sortie, des paramètres connus et des paramètres à identifier.

B.1.2 Choix de mesures pour l'identification

Le succès de l'identification des paramètres dynamiques dépend du choix des scénarios utilisés pour la simulation. La simulation choisie pour l'identification doit donc être telle que la matrice des paramètres à identifier soit bien conditionnée, c'est-à-dire que le test choisi pour la simulation sollicite tous les paramètres qui doivent être identifiés. Pour obtenir un bon conditionnement deux stratégies sont possibles :

1. La détermination par le calcul de mouvements qui permette d'avoir un conditionnement de la matrice d'observation proche de l'unité. De tels mouvements sont dits excitants.

2. L'excitation des paramètres par petits groupes avec des mouvements simples, ne sollicitant que certaines articulations. Ces mouvements sont appelés excitants séquentiels.

B.1.3 Pré-traitement des données

Le pré-traitement des données consiste en une étape de filtrage passe-bande des données brutes et à déterminer les offset des capteurs.

B.2 Méthodes d'identification

Parmi les méthodes les plus répandues dans la littérature, on cite la célèbre méthode des moindres carrés standards et pondérés. Ici on s'intéresse uniquement à la méthode PEM (Prediction Error Method).

B.2.1 L'algorithme PEM

PEM (Prediction Error Method) est un algorithme d'identification des paramètres dynamique du modèle en utilisant une méthode itérative qui minimise les erreurs de prédiction (Cet algorithme est disponible sous la commande "pem" dans le Toolbox d'identification de Matlab).

Synthèse de l'algorithme

Soit V_N , le critère de la fonction à minimiser donné par :

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N l(\epsilon_p(t, \theta_p), \theta_p) \quad (\text{B.1})$$

avec :

θ_p : Vecteur des paramètres du modèle

$l(\epsilon_p(t, \theta_p), \theta_p)$: norme utilisée pour la prédiction des erreurs dans le critère.

$\epsilon_p(t, \theta_p)$: prédiction d'erreur ($Y(t)$ - $Y_e(t, \theta_p)$).

$Y_e(t, \theta_p)$: vecteur de sortie estimé à l'instant t .

$Z^N = (Y^N, U^N)$: Vecteur d'entrées/sorties pour $t=1 : N$

En général la fonction $V(\theta_p)$ ne peut pas être minimisée par des moyens analytiques directs. La minimisation doit alors se faire par une méthode itérative numérique.

Minimisation numérique La méthode numérique pour la minimisation de $V(\theta_p)$ se fait habituellement comme suit :

$$\theta_{pe}^{(i+1)} = \theta_{pe}^{(i)} + \alpha_p f^{(i)} \quad (\text{B.2})$$

$f^{(i)}$: est une direction de recherche de $V(\theta_p)$ basée sur des informations acquises lors des précédentes itérations

α_p : est une constante positive déterminée pour décroître les valeurs de $V(\theta_p)$ pour chaque itération i .

$\theta_{p_e}^{(i)}$: Vecteur des paramètres estimés du modèle à l'itération i .

La détermination de f^i dépend des informations fournies par l'utilisateur. Les méthodes numériques de minimisation peuvent être divisées en trois groupes :

1. méthodes utilisant que les valeurs la fonction $V(\theta_p)$
2. méthodes utilisant les valeurs de la fonction $V(\theta_p)$ et les valeurs de son gradient
3. méthodes utilisant les valeurs de la fonction $V(\theta_p)$, de son gradient, et les valeurs de sa deuxième dérivée (l'algorithme de Newton).

Dans notre cas, pour l'identification des paramètres dynamiques on utilise l'algorithme de Newton :

$$f^{(i)} = \left[V'' \left(\theta_{p_e}^{(i)} \right) \right]^{-1} V'(\theta_{p_e}^{(i)}) \quad (\text{B.3})$$

Le plus simple pour l'identification est de fournir un tel algorithme avec les informations nécessaires et de laisser la recherche du minimum au programme. Dans tous les cas, il est indispensable de calculer à chaque itération les valeurs de la fonction $V(\theta_p)$ qui sont nécessaires pour toute valeur de θ_p . La lourde charge dans cela réside dans le calcul de la séquence de prédiction des erreurs $\epsilon_p(t, \theta_p)$, $t = 1, \dots, N$.

Le gradient de l'équation (B.1) s'écrit :

$$V'_N(\theta_p, Z^N) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ \psi_p(t, \theta_p) l'_{\epsilon_p}(\epsilon_p(t, \theta_p), \theta_p) - l'_{\theta_p}(\epsilon_p(t, \theta_p), \theta_p) \right\} \quad (\text{B.4})$$

où $\psi_p(t, \theta_p)$ est la dérivée de $Y_e(t, \theta_p)$ selon θ_p .

Cependant, pour certains modèles le calcul direct de $\psi_p(t, \theta_p)$ pourrait être impossible. On a donc recours à des méthodes de minimisation du premier groupe ou à des estimations de $\psi_p(t, \theta_p)$ par différentes approximations.

B.3 Simulations et validations

Dans cette section, nous proposons d'identifier les paramètres intervenant dans la dynamique latérale du véhicule, en utilisant le modèle bicyclette à deux variables puis à quatre variables d'état et la méthode d'identification PEM. Nous montrerons par la suite les résultats de validation de ces paramètres.

B.3.1 Identification de I_z , C_f et C_r

Afin d'assurer l'identifiabilité du modèle, la masse du véhicule est supposée connue et constante. Ceci est vrai pour des tests de simulation à courte durée.

Annexe B. Identification des paramètres du véhicule

Le modèle bicyclette a deux variables d'état $\underline{\underline{X}} = [V_y \ \dot{\psi}]^T$ représenté par le système (B.5) est utilisé.

$$\dot{\underline{\underline{X}}} = \underline{\underline{A}}\underline{\underline{X}} + \underline{\underline{B}}\underline{\underline{u}} \quad (\text{B.5})$$

avec

$$\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{C_f + C_r}{mv} & -\frac{l_r C_r - l_f C_f}{mv} \\ -\frac{l_f C_f - l_r c_r}{I_z v} & -\frac{l_f^2 C_2 + l_r^2 C_r}{I_z v} \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{B}} = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{l_f^m C_f} \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}$$

Choix de mesures : Pour la réussite de l'identification, il faut que les tests choisis pour la simulation sollicitent tous les paramètres à identifier, pour cela les consignes suivantes sont considérées.

- piste plane sans pente ni dévers
- trajectoire spirale lente
- conduite normale à vitesse constante ($V = 10m/s$).

Après simulation sur MATLAB et en utilisant la commande PEM, nous avons obtenu les résultats suivants :

TAB. B.1 – Résultats d'identification des paramètres C_f , C_r et I_z

C_f	rigidité latérale des pneus avant	$N.rad^{-1}$	48846
C_r	rigidité latérale des pneus arrière	$N.rad^{-1}$	50908
I_z	moment d'inertie autour de l'axe de lacet	$kg.m^2$	2044.3

Validation des résultats : Dans cette partie nous allons comparer les réponses du modèle du véhicule qui intègre les paramètres identifiés par l'algorithme PEM avec les signaux réels mesurés par les capteurs de vitesse latérale (Correvit) et de vitesse de lacet (centrale inertuelle). Les résultats de validation sont présentés par les deux figures Fig B.1 et Fig B.2 et les erreurs commises sont données dans le tableau B.3

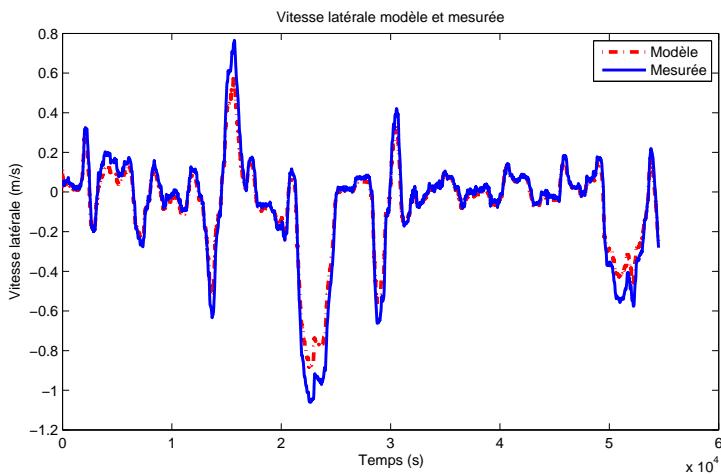


FIG. B.1 – Vitesse latérale simulée et mesurée

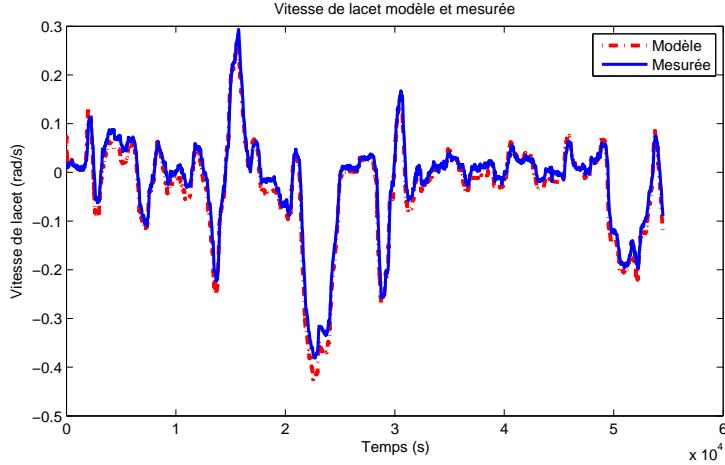


FIG. B.2 – Vitesse de lacet simulée et mesurée

TAB. B.2 – Erreurs de validation : moyenne et maximale

ϵ	$\frac{moy(\epsilon_{V_y})}{\max(V_y)}$	$\frac{moy(\epsilon_{\dot{\psi}})}{\max(\dot{\psi})}$
$\epsilon(\%)$	5.33	5.51
ϵ	$\frac{\max(\epsilon_{V_y})}{\max(V_y)}$	$\frac{\max(\epsilon_{\dot{\psi}})}{\max(\dot{\psi})}$
$\epsilon(\%)$	6.96	10.77

B.3.2 Identification des paramètres I_x , k_r , et b_r

Pour que le moment d'inertie (I_x), la rigidité et l'amortissement de la tige anti-roulis (k_r et b_r) soient identifiables, on doit supposer que la masse du véhicule et les paramètres identifiés dans la section ci-dessus sont connus. Le modèle bicyclette du véhicule, donné par le système suivant, est utilisé.

$$\dot{X}_{au} = A_{au}X_{au} + B_{au}u_{au} \quad (\text{B.6})$$

avec

$$A_{au} = \begin{bmatrix} -\frac{I_e C_0}{I_x m V} & -1 - \frac{I_e C_1}{I_x m V^2} & \frac{h_r(mgh_r - k_r)}{I_x V} & -\frac{h_r l_r}{I_x V} \\ -\frac{C_1}{I_z} & -\frac{C_2}{I_z V} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{C_0 h_r}{I_x V} & -\frac{C_1 h_r}{I_x V} & \frac{mgh_r - k_r}{I_x} & -\frac{b_r}{I_x} \end{bmatrix}$$

$$B_{au} = \begin{bmatrix} \frac{I_e C_f}{I_x m V} \\ \frac{l_f C_f}{I_z} \\ 0 \\ \frac{C_f}{I_x} \end{bmatrix}, \quad \left| \begin{array}{l} C_0 = C_{sf} + C_{sr} \\ C_1 = l_f C_{sf} - l_r C_{sr} \\ C_2 = l_f^2 C_{sf} + l_r^2 C_{sr} \\ I_e = I_x + mh_r^2 \end{array} \right.$$

Choix de mesures : Pour la réussite de l'identification il faut que les tests choisis pour la simulation sollicitent tous les paramètres à identifier. Pour cela les consignes suivantes sont

considérées :

- piste plane sans pente ni dévers ;
- trajectoire spirale ;
- conduite normale à vitesse constante ($V = 15m/s$).

Après simulation sur MATLAB et en utilisant la commande PEM, nous avons obtenu les résultats suivants :

TAB. B.3 – Résultats d’identification des paramètres b_r et k_r , I_x

b_r	l’amortissement de la tige anti-roulis	$N.rad^{-1}$	4448
k_r	rigidité de la tige anti-roulis	$N.rad^{-1}$	76333
I_x	moment d’inertie autour de l’axe de roulis	$kg.m^2$	380

Validation des résultats : La procédure est la même que précédemment, le calcul des erreurs entre le modèle et les sorties de capteurs porte sur l’angle de dérive, vitesse de lacet, l’angle et la vitesse de roulis. Les résultats sont présentés sur les figures Fig B.3 à Fig B.6. Les erreurs calculées sont données dans le tableau B.4

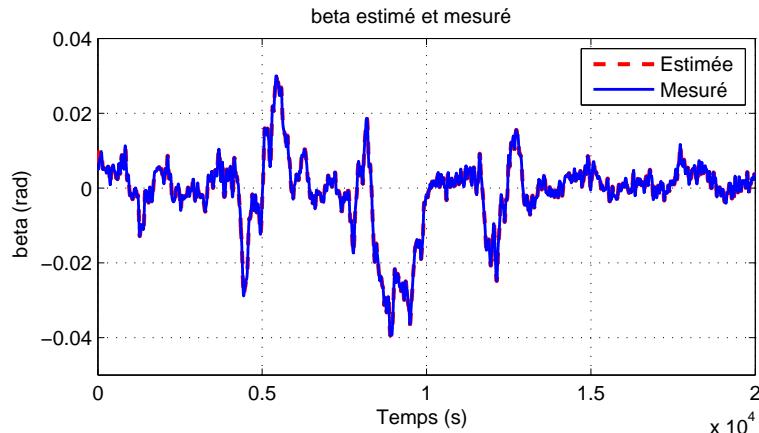


FIG. B.3 – Angle de dérive simulé et mesuré

TAB. B.4 – Erreur de validation : moyennes et maximales

ϵ	$\frac{mean(\epsilon_\beta)}{max(\beta)}$	$\frac{mean(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{mean(\epsilon_{\phi_v})}{max(\phi_v)}$	$\frac{mean(\epsilon_{\dot{\phi}_v})}{max(\dot{\phi}_v)}$
$\epsilon(\%)$	1.40	0.511	0.19	3.70
ϵ	$\frac{max(\epsilon_\beta)}{max(\beta)}$	$\frac{max(\epsilon_{\dot{\psi}})}{max(\dot{\psi})}$	$\frac{max(\epsilon_{\phi_v})}{max(\phi_v)}$	$\frac{max(\epsilon_{\dot{\phi}_v})}{max(\dot{\phi}_v)}$
$\epsilon(\%)$	8.20	2.28	1.30	10.68

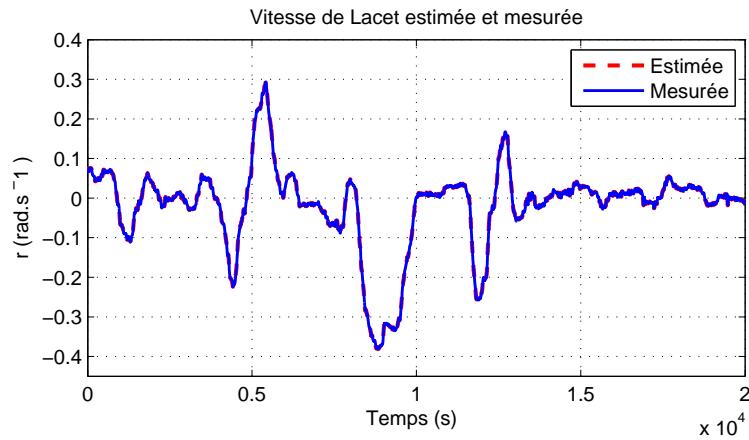


FIG. B.4 – Vitesse de lacet estimée et mesurée

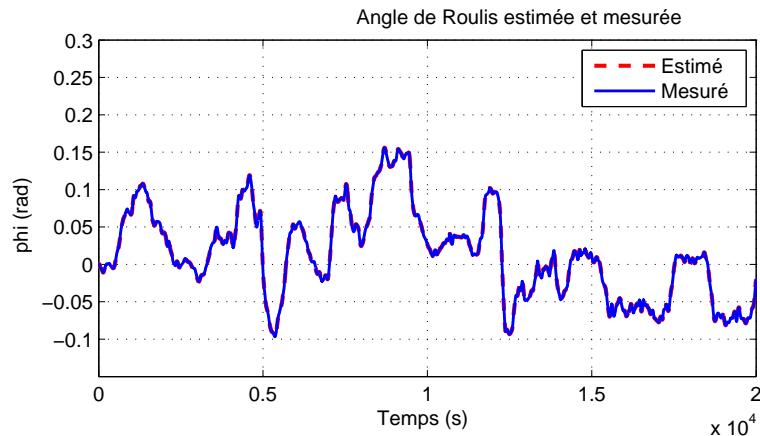


FIG. B.5 – Angle de roulis simulé et mesuré

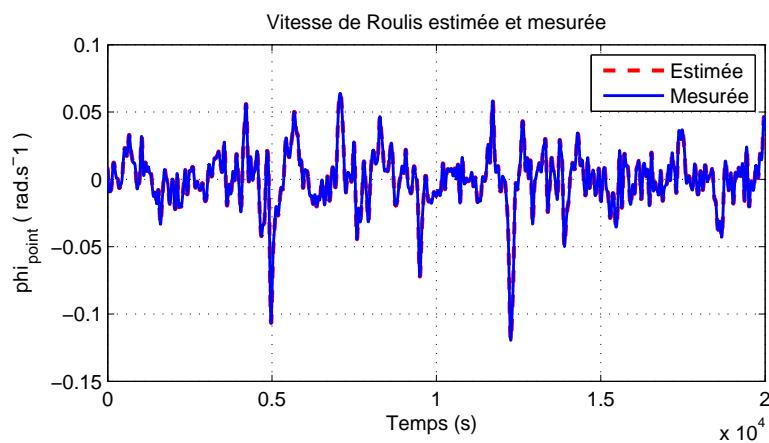


FIG. B.6 – Vitesse de roulis simulée et mesurée

C

Résultats d'estimation des autres variables d'état du véhicule

Dans cette annexe on présente quelques résultats d'estimation des variables d'état du véhicule. Ces variables ont peu de rapport avec le travail développé précédemment, mais elles jouent un rôle très important dans la dynamique du véhicule et notamment pour le contrôler ou pour assurer sa stabilité.

Les résultats présentés ci-après ont tous été obtenus par l'application du filtre de Kalman sur le modèle non-linéaire du véhicule. Les entrées de cet estimateur sont les mêmes avec celles présentées dans la section 7.3.1.

Les deux figures Fig C.1 et Fig C.2 montrent respectivement le résultat d'estimation des glissements longitudinaux et latéraux des quatre pneumatiques. Les glissements longitudinaux sont plus importants dans les cas de fortes accélérations ou dans les cas des forts freinages du véhicule. Quant aux glissements latéraux (angles de dérive des pneumatiques), ils augmentent avec la courbure. On rappelle que les équations des ces variables sont données respectivement par (C.1) et (C.2)

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{\omega_i R_{e_i}}{V_{x_i}} - 1 & \text{(cas de freinage)} \\ \lambda_i = 1 - \frac{V_{x_i}}{\omega_i R_{e_i}} & \text{(cas d'accélération)} \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \delta - \arctan\left(\frac{V_{y_1} + l_f \dot{\psi}}{V_{x_1} - \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_2 = \delta - \arctan\left(\frac{V_{y_2} + l_f \dot{\psi}}{V_{x_2} + \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_3 = -\arctan\left(\frac{V_{y_3} - l_r \dot{\psi}}{V_{x_3} - \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \\ \alpha_4 = -\arctan\left(\frac{V_{y_4} - l_r \dot{\psi}}{V_{x_4} + \frac{S_b}{2} \dot{\psi}}\right) \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

La figure C.3 montre les résultats d'estimation de l'adhérence des pneumatiques du véhicule obtenus à partir du modèle de Burckhardt, elle est en fonction de la résultante des glissements longitudinaux et transversaux ($S_{ad_i} = \sqrt{\alpha_i^2 + \lambda_i^2}$). Cette méthode réside sur différents paramètres qui sont fonction du sol sur lequel se trouve la roue (C_{ad_1} , C_{ad_2} et C_{ad_3}), de la vitesse maximale de conduite (C_{ad_4}) et de la charge maximale appliquée sur la roue (C_{ad_5}).

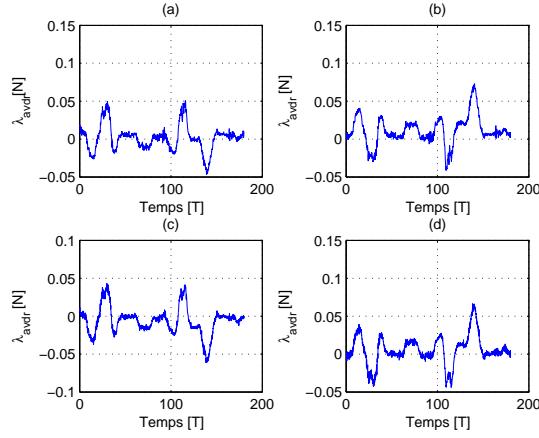


FIG. C.1 – Résultat d'estimation des glissements longitudinaux

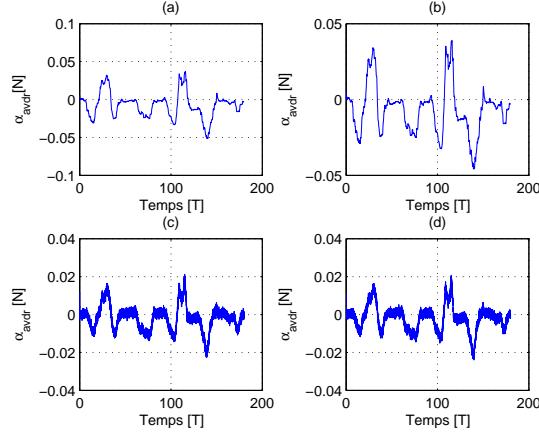


FIG. C.2 – Résultat d'estimation des angles de dérive des pneumatiques (glissements latéraux)

$$\mu_i(S_{ad_i}) = (C_{ad_1}(1 - \exp(C_{ad_2}S_{ad_i}) - C_{ad_3}S_{ad_i}) \exp(-C_{ad_4}S_{ad_i}v)(1 - C_{ad_5}(F_{n_i})^2))$$

La figure C.4 donne un aperçu de la dynamique longitudinale du véhicule, on remarque bien que cette dynamique évolue dans la zone de linéarité et de glissement. La figure C.5 donne un aperçu sur la dynamique latérale du véhicule, elle représente les variations des forces latérales en fonction des glissements latéraux. La dynamique latérale du véhicule évolue, en majeur partie, dans la zone de linéarité.

Les deux figures Fig C.6 et Fig C.7 illustrent respectivement les raideurs longitudinales (K_{p_i}) et latérales (C_{s_i}) des pneumatiques. Les variations de ces deux variables sont dues essentiellement au transfert de charge, aux variations de la pression à l'intérieur des pneumatiques, à la variation de la vitesse du véhicule...

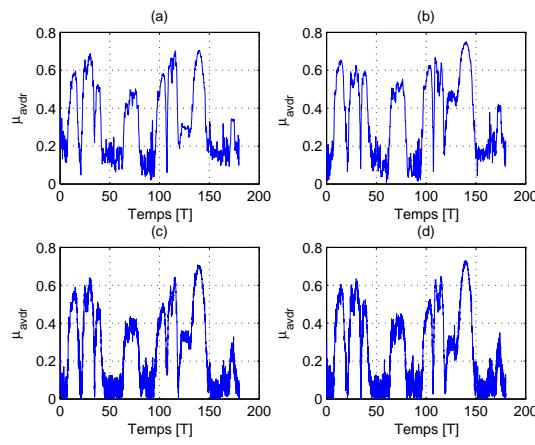


FIG. C.3 – Résultat d'estimation de l'adhérence mobilisable des pneumatiques

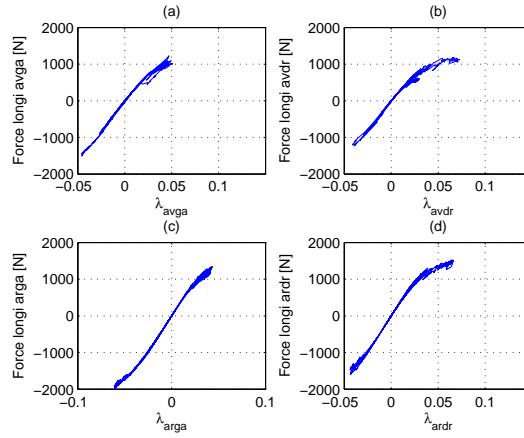


FIG. C.4 – Variations des forces longitudinales en fonction des glissement longitudinaux

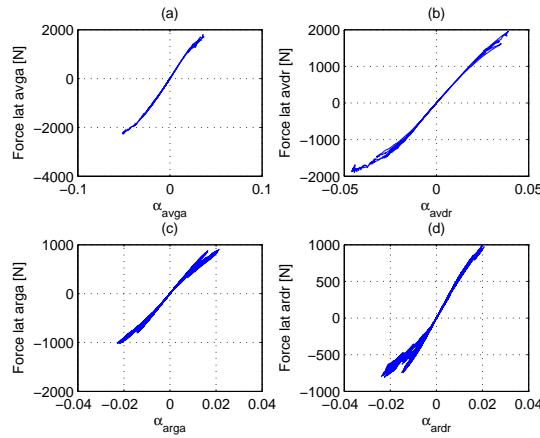


FIG. C.5 – Variation des forces latérales en fonction des glissement latéraux

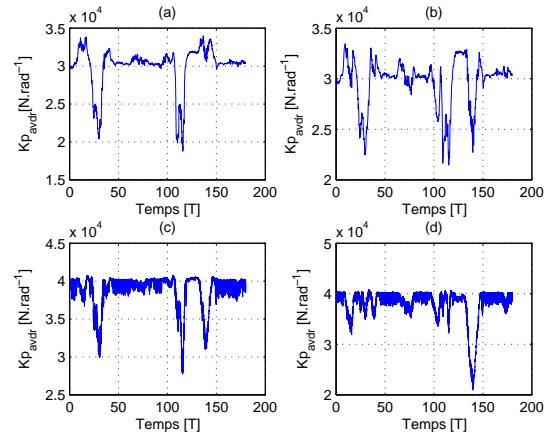


FIG. C.6 – Résultat d'identification des raideurs longitudinales des pneumatiques

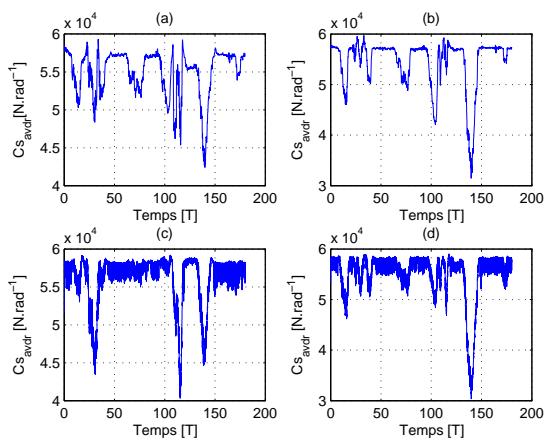


FIG. C.7 – Résultat d'identification des raideurs latérales des pneumatiques

Bibliographie

- [Adi03] ADIT, Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique L'ITS aux États-Unis et au Japon dans le domaine du transport : *Innovation technologique et société*, Rapport de Centre de Prospective et de Veille scientifiques et technologiques (CPVST) du Ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement durable et du l'aménagement du territoire, 2003.
- [Alb94] A. Album, *Modélisation et commande dynamique du automobile pour la sécurité de conduite*. PhD thesis. Université de Technologie de Compiègne, 1994.
- [Aub99] D. Aubry, *Contribution à la synthèse d'observateurs pour les systèmes linéaires*, Thèse, Université Henri Poincaré, 1999.
- [Auf00a] R. Aufrère, F. Marmoiton, R. Chapuis, F. Collange and J.P. Dérutin, *Détection de route et suivi de véhicules par vision*, ACC, Traitement du signal, Vol.17, N.3, 2000.
- [Auf00b] R. Aufrère, R. Chapuis and F. Chausse, *Détection précise des bords de route par vision monoculaire embarquée*, In 12eme congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Paris, France, 2000.
- [Auf01] R. Aufrère, R. Chapuis and F. Chausse, *A model-driven approach for real-time road recognition*, *Machine Vision and Applications*, Springer-Verlag, pp. 95-107, 2001.
- [Auf01b] R. Aufrère *Reconnaissance et suivi de route par vision artificielle, application à l'aide à la conduite*, PhD thesis, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand (France), Juin 2001.
- [Bae01] H.S. Bae, J. Ryu, and C. Gerdes, *Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS*, Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Oakland, California, August 2001.
- [Bak89] E. Bakker, H.B. Pacejka, and L. Lidner. *A new tire model with an application in vehicle dynamics studies*, In SAE. SAE paper, 1989.
- [Bar00] G. Iulia Bara, Jamal Daafouz, José Ragot and Frédéric Kratz, *State estimation for affine LPV systems*, Decision and Control, Australie, 2000.
- [Bar01] G. Iulia Bara, Jamal Daafouz, José Ragot and Frédéric Kratz, *Reconstruction d'état des systèmes à paramètres variables*, In Journées Doctorales d'Automatique, Toulouse, France, September 2001.
- [Bat95] S. Baten and N. Müller. *Navigation with an autonomous vehicle on arbitrary roads*, In 3rd International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart, Germany, 1995.
- [Bav93] P. Bavle, J. Forissier, and S. Lafon, *A new tyre model for vehicle dynamics simulation*, Automotive technology International, pages 193 198, 1993.
- [Ben07] N. Benmansour, R. Labayrade, D. Aubert and S. Glaser, *A model driven 3D lane detection system using stereovision*, ICARCV, Vietnam, 2007.

Bibliographie

- [Ben08] N. Benmansour, R. Labayrade, D. Aubert and S. Glaser, *Stereovision-based 3D lane detection system : a model driven approach*, ITSC, chine, 2008.
- [Ber00] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli, and S. Nicelle, *Stereo vision-based vehicle detection*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2000.
- [Ber02] O. Bernard and J.L. Gouzé, *State estimation for bioprocesses*, In lecture notes : Mathematical Control Theory, Trieste, ICTP, 2002.
- [Bev01] D. Bevly, R. Sheridan, et J. C. Gerdes, *Integrating ins sensors with gps velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness*, In Proceedings of the American Control Conference, pp. 25-30, Juin 2001.
- [Bol99] P. Bolzern, F.Cheli, G. Falciola and F.Resta, *Estimation of the nonlinear suspension tyre cornering forces on experimental road test data*, Vehicle system dynamics, 1999.
- [Bou05] M. Bouteldja. *Modélisation des interactions dynamiques poids lourd/infrastructures pour la sécurité et les alerte*, In PhD thesis, Université de Versailles - Saint Quentin en Yvelines, 2005.
- [Bou97] M. Boutayeb, D. Aubry, and M. Darouach, *Robust observers design for a class of nonlinear discrete-time systems*, In Proceedings of the 4th European Control Conference, Bruxelles, Belgique, 1997.
- [Bou99] M. Boutayeb and D. Aubry, *A strong tracking extended Kalman observer for nonlinear discrete-time systems*, IEEE Trans. on Automatic Control, 1999.
- [Bra95] P. Brand, *Reconstruction tridimensionnelle d'une scène à partir d'une caméra en mouvement : de l'influence de la précision*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, France, October 1995.
- [Bro01] T. Brown, and D. Rhode, *Roll over stability control for an automotive vehicle*, United states Patent. Patent Number : 6324446, 2001.
- [Bro02] A. Broggi, M. Bertozzi, G. Conte and A. Fascioli, *ARGO prototype vehicle*, Intelligent Vehicle Technologies, 2001.
- [Bro06] J. P. Brossard, *Dynamique du véhicule : Modélisation des systèmes complexes*, Presses polytechnique et universitaires romandes, imprimé en Italy, France, 2006.
- [Bro95] A. Broggi, *Robust Real-Time Lane and Road Detection in Critical Shadow Conditions*, In Proceedings IEEE International Symposium on Computer Vision, pp. 353-358, 1995.
- [Bru05] S. Bruel et D. Ho *Les transports intelligents au Japon* Dépêche No. SMM05053 de Ambassade de France à Tokyo Service pour la Science et la Technologie, 2005.
- [Bul05] D. Bullocka et J. Zelek *Towards real-time 3-D monocular visual tracking of human limbs in unconstrained environments* Real-Time Imaging, Vol 11, pp 323-353, 2005.
- [Bur93] M. Burckhardt. Fahrwerktechnik, radschlupfregelsysteme. In *Vogel Verlag.*, Germany, 1993.
- [Can03] C. Canudas-De-Wit, P.Tsiotras, E. Velenis, M. Basset and O. Gerard, *Dynamic friction models for road tire longitudinal interaction*. Vehicle System Dynamics, 2003.
- [Can95] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, and P. Lischinsky. *A new model for control of systems with friction*. In IEEE Tran., vol. 40, no. 3. pages 419-425, March, 1995.
- [Car00] Chargés de communication des centres de recherche INRIA CARSENSE : *perception autour de la voiture à basse vitesse Communiqué de presse*, <http://www.inria.fr/presse/pre68.fr.html>, Mai 2000.

-
- [Car03] C. R. Carlson and J. C. Gerdes, *Optimal rollover prevention with steer by wire and differential braking*, in ASME Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC, vol. 72, no. 1, Washington, D.C., 2003, pp. 345-354.
- [Ccf04] CCFA. Automobile et sécurité : L'automobile citoyenne. Technical report, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles, 2004.
- [Cha91] R. Chapuis *Suivi de primitives image, application à la conduite automatique sur route*, PhD thesis, Univ. B. Pascal, Clermont-Ferrand France, Janvier 1991.
- [Cha94] F. Chausse *Reconstruction 3D de courbes paramétriques polynomiales par filtrage temporel. Approche par coopération vision par ordinateur / infographie. Application aux scènes routières*, PhD thesis, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand (France), Décembre 1994.
- [Cha95] R. Chapuis, A. Potelle, J.L. Brame and F. Chausse *Real time vehicle trajectory supervision on the highway*, International Journal of Robotics Research, Dec. 1995.
- [Cha99] R. Chapuis, R. Aufrère and F. Chausse *Recovering a 3D shape of a road by vision*, In 7th International Conference on Image Processing and its Applications-IPA99, volume II, pages 686-690, Manchester (U.K.), July 1999.
- [Cha00] F. Chausse, R. Aufrère and R. Chapuis *Recovering the 3d shape of a road by on-board monocular vision* In 15ème congrès ICPR, pages 325-328, Barcelona, Sept 2000.
- [Cha06] A. Chaïbet, *Contrôle latéral et longitudinal pour le suivi de véhicule*. In PhD thesis. Université d'Évry Val d'Essonne, 2006.
- [Che93] G. Chen, *Approximate Kalman filtering*, World Scientific series in approximations and decompositions, 1993.
- [Chi06] F. CHIKHI, *Système prédictif et préventif d'aide à la conduite*, PhD thesis. Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, 2006.
- [Cou02] P. Coulombeau, and C. Laugeau, *Yaw, Pitch, Roll and 3D Road Shape Recovery by Vision*, In Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Vehicles 2002, Versailles, France, June 2002.
- [Dak08] D. Dakhllallah, S. Glaser, S. Mammar and Y. Sebsadji, *Tire-Road Forces Estimation Using Extended Kalman Filter and Mobilized Friction Coefficient and Sideslip Angle Evaluation*. American Control Conference. Seattle, Washington, USA, June 2008.
- [Del03] Y. Delanne, *Application des méthodes de traitement de signal et d'identification aux études de l'interaction véhicule/pneumatique/chaussée*, Habilitation à diriger les recherches. Université de Versailles, 2003.
- [Dem88] D. DeMenthon, *Reconstruction of a road by matching edge points in the road image*, In Technical Report CAR-TR-368, Computer Vision Laboratory, Center for Automation Research, University of Maryland, College Park MD20742, June 1988.
- [Dem90] D. DeMenthon and L.S. Davis *Reconstruction of a road by local image matches and global 3d optimization*, In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1337-1342, Cincinnati, May 1990.
- [Det97] S.F. Detalle and F. Cailliege, *A tyre model for interactive driving simulators*. Vehicle system dynamics, Supplement 27 (326 329), 1997.
- [Dic86] E.D. Dickmanns, and A. Zapp, *A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision*. In Proceedings of SPIE Conference on Mobile Robots, Vol 727, 1986.

Bibliographie

- [Dic88] E.D. Dickmanns and V. Graefe, *Dynamic monocular machine vision and applications of dynamic monocular vision*, International Journal of Machine Vision and Application, 1988.
- [Dic92] E.D. Dickmanns, and B.D. Mysliwetz, *Recursive 3D road and relative ego-state recognition*. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, N. 2, pp. 199-213, February 1992.
- [Dic93] E.D. Dickmanns, R. Behringer, C. Brudigam, D. Dickmanns, F. Thomanek, and V. von Holt. *An all-transputer visual autobahn-autopilot/copilot*, In International Conference on Computer Vision, pages 608-615, 1993.
- [Dug69] F. Dugoff, P. Fencher, and L. Segel, *Tire performance characteristics affecting vehicle response to steering and braking control inputs*, Technical report. University of Michigan, 1969.
- [Dug70] J. Dugoff, P. Fanches et L. Segel. *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*. SAE, (700377), 1970.
- [Eid07] Andreas Eidehalla, b, Jochen Pohla, Fredrik Gustafsson *Joint road geometry estimation and vehicle tracking*, Control Engineering Practice, 2007.
- [Eid07] Andreas Eidehalla, b, Jochen Pohla, Fredrik Gustafsson *Joint road geometry estimation and vehicle tracking*, Control Engineering Practice, 2007.
- [Eur97] EUREKA pan-European network for market-oriented, industrial R&D. EUREKA PROJECT E45-PROMETHEUS. <http://www.eureka.be/inaction/AcSearchProject.do>, 1997.
- [Fra00] U. Franke and A. Joos. Real-time stereo vision for urban traffic scene understanding, In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, USA, October 2000.
- [Fra92] T. Fraichard, M. Hassoun et N. Lefort *An electronic co-pilot : The Pro-Lab II demonstrator*, Proceeding of the 3rd PROMETHEUS Collision Avoidance Workshop, pp 230-237, 1992.
- [Gal00] A. GALLET, M. SPIGAI, and M. HAMIDI. *Use of vehicle navigation in driver assistance systems*, In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp, 492-497, 2000.
- [Gau94] J. P. Gauthier and G. Bornard. *Observability for any $u(t)$ of a class of nonlinear systems*. IEEE Trans. Automatic Control, 1994.
- [Ger07] D. Geronimi, A. D. Sappa, A. Lopez, and D. Ponsa. *Adaptive image sampling and windows classification for on-board pedestrian detection*, In Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision Systems, Bielefeld, Germany, April 2007.
- [Gla03] S. Glaser and V. Aguilera. *Vehicle infrastructure driver speed profile : towards the next generation of curve warning system*. In ITS Madrid, 2003.
- [Gla04] S. Glaser, *Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoire limites Application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. Thèse, Université d'Evry Val d'Essonne, France, 2004.
- [Gre93] M. Grewal and A. Andrews, *Kalman filtering : Theory and practice*, Prentice Hall, 1993.
- [Gui99a] F. Guichard, and J.-P. Tarel, *Curve Extraction Combining Perceptual Grouping and a Kalman Like Fitting*. In proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 1999.

-
- [Gui99b] A. Guiducci, *Parametric model of the perspective projection of a road with applications to lane keeping and 3D road reconstruction*. Computer Vision and Image Understanding, March 1999.
- [Hac00] Hac, A. and Simpson, M. D., *Estimation of Vehicle Side Slope Angle and Yaw Rate*, SEA 2000 World congress Detroit, Michigan March 6-9, 2000.
- [Had01] A. EL HADRI. *Modélisation de véhicules, observation d'état et estimation des forces pneumatiques : Application au contrôle longitudinal*, In PhD thesis, Université de Versailles - Saint Quentin en Yvelines, 2001.
- [Hah02a] J.O. Hahn, R. Rajamani and L. Alexander, *GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient*, IEEE Trans. Contr. Syst. Technol, vol. 10, pp. 331-343, May 2002.
- [Hah02b] J.O. Hahn, R. Rajamani, S.H. You, and K. Lee, *Road bank angle estimation using disturbance observer*, in Proc. Symp. Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan, pp. 381-386, 2002
- [Hah04] J.O. Hahn, R. Rajamani, S.H. You, and K. Lee, *Real-Time Identification of Road-Bank Angle Using Differential GPS*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 12, N. 4, pp. 589-599, JULY 2004
- [Her77] R. Herman and J. Krener, *Nonlinear controllability and observability*, IEEE Trans, Automatic Control, 728-740, 1977.
- [Hie04] M. Hiemer. *Model based detection and reconstruction of road traffic accidents*. In PhD thesis. Université Fridericiana, Allemagne, 2004.
- [Hu03] T. Hu et Z. Lin *Composite quadratic Lyapunov functions for constrained control systems* IEEE Transactions on Automatic Control, 2003.
- [Imi03] H. Imine. *Observation d'états d'un véhicule pour l'estimation du profil dans les traces de roulement*. PhD thesis. Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, 2003.
- [Jul97] S. J. Julier, *Process Models for the Navigation of High Speed Land Vehicles*, PhD thesis, University of Oxford, Departement of Engineering Science, 1997.
- [Jun05] C.R. Jung and C.R. Kelber, *Lane following and lane departure using a linear-parabolic model*, Image and Vision Computing, vol 23, 2005.
- [Kal60] R.E. Kalman. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, March 1960.
- [Kan87] A. Kanafani, R. E. Parson et H. R. Ross *Status of Foreign Advanced Highway Technology*, California PATH Research Paper UCB-ITS-PRR-87-2, 1987.
- [Kan90] K. Kanatani and K. Watanabe, *Reconstruction of 3D road geometry from images for autonomous land vehicles*, IEEE Transactions On Robotics and Automation, 6 :127-132, Feb. 1990.
- [Kar02] Matthew G. Karlaftis, Ioannis Golias *Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates*, Accident Analysis and Prevention, 2001.
- [Koe02] D. Koenig and S. Mammar, *Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems*, IEEE Trans. Automat. Contr. vol 47, N 12, 2002.
- [Koe03] D. Koenig and S. Mammar, *Fault tolerant in descriptor linear systems via generalized proportional-integral regulator/observer*, American Control Conference, 2003.

Bibliographie

- [Koe05] D. Koenig, *Unknown input proportional multiple-integral observer design for linear descriptor systems : Application for state and fault estimation*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol 50, 2, pp 212-217, 2005.
- [Lab03] R. Labayrade, and D. Aubert, *A Single Framework for Vehicle Roll, Pitch, Yaw Estimation and Obstacles Detection by Stereovision*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003, Columbus, 9-11 June 2003.
- [Lab04a] Raphaël Labayrade *Détection Générique, Robuste et Rapide d'Obstacles Routiers par Stéréovision Embarquée*, thèse de l'université Pierre et Marie Curie, France, 2004.
- [Lab04b] R. Labayrade, S.-S. Ieng, and D. Aubert, *A reliable road lane detector approach combining two vision-based algorithms*, ITSC, USA, 2004.
- [Lab05] R. Labayrade *Détection Générique, Robuste et Rapide d'Obstacles Routiers par Stéréovision Embarquée*, thèse de l'université Pierre et Marie Curie, France, 2004.
- [Lak00] S. Lakshmanan B. Ma and A.O. Hero, *Pavement boundary detection via curcular shape model*, In IEEE International Conference Intelligent Vehicles (ICIV'2000), Dearborn, USA, 2000.
- [Lar08] *La Route Automatisée* <http://www.lara.prd.fr>, Lien vers le site web de consortium La Route Automatisée, 2008.
- [Lau02] J. P. Lauffenburger, *Contribution à la surveillance temps-réel du système conducteur - véhicule - environnement : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite*, In PhD thesis, Université de Haute Alsace, 2002.
- [Lav06] Chargés de communication de presse du projet LAVIA, Colloque LAVIA, *Les premiers résultats des tests d'acceptabilité du Limiteur s'Adaptant à la VITESSE Autorisée*, Communiqué de presse fait le 9 novembre 2006, <http://heberge.lcpc.fr/lavia/download/colloque091106/CP-2006.pdf>, 2006.
- [Lec01] D. Lechner. *Analyse du comportement dynamique des véhicules routiers légers : développement d'une méthodologie appliquée à la sécurité primaire*. PhD thesis. École centrale de Lyon, 2001.
- [Lég00] Légifrance, *Code de la route*. A consulter sur le site internet de Légifrance <http://www.legifrance.gouv.fr/>.
- [Li07] L. li, F.Y Wang, *Advanced motion control and sensing for intelligent vehicles*, Livre, Springer science, imprimé par acid-free paper, Etats-Unis, 2007.
- [Lii02] E. Liikanen, *Towards a comprehensive eSafety action plan for improving road safety in europe*, In Lyon eSafety Congress-Commission Communication on Intelligent Vehicle and Road Safety, 2002.
- [Lom05] P. Lombardi, M. Zanin and S. Messelodi, *Switching Models for Vision- Based On-Board Road Detection*, In Proceedings of IEEE Intelligent Transport System Conference, Austria, 2005.
- [Lue71] D.G. Luenberger, *An introduction to observers*. IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 16, pp. 896-602, 1971.
- [Mam02] S. Mammar, *Contrôle latérale assisté et automatisé des véhicules : Approche par commandes robustes*. In Habilitation à diriger la recherche, HDR de l'Université d'Évry-Val d'Essonne, Septembre, 2002.
- [Mam06a] S. Mammar, S. Glaser, and M. Netto. *Time to line crossing for lane departure avoidance : a theoretical study and an experimental setting*. In IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006.

-
- [Mam06b] S. Mammar, S. Glaser and M. Netto, *Vehicle lateral Dynamics estimation using unknown input proportional-integral observers*. American Control Conference, 2006.
- [Mam06c] S. Mammar, S. Glaser and M. Netto, *Unknown input proportional-integral observers for lateral vehicle dynamics estimation*. Vehicle System Dynamics, 2006.
- [Mar03] B. Marx, *Contribution à la Commande et au Diagnostic des Systèmes Algébro-Différentiels Linéaires*, Thèse de l'école doctorale Electronique, Électrotechnique, Automatique, Télécommunications et Signal, France, 2003.
- [Mar04] Marcus Hiemer, *Model Based Detection and reconstruction of road traffic accidents*. Thèse, Université de Karlsruhe, Allemagne, 2004.
- [Mic05] J.E Michel and M.C. Best, *Les pertes de contrôle en courbe - cinématique, typologie, caractéristiques des lieux*, Rapport INRETS, n 262, Département Mécanismes d'accidents, 2005.
- [Min08] N. Minoiu-Enache, *Assistance préventive à la sortie de voie*. Thèse, Université d'Evry Val d'Essonne, France, 2008.
- [Mor03] X. Moreau, *Dérivateur D'ordre Non Entier : Différentes Approches de Synthèses et Applications Au Contrôle Des Vibrations*, PhD thesis, Université de Bordeaux, 2003.
- [Mor07] R. T. Moreo, A. Z. Izquierdo, B. U. Minarro, A. F. G. Skarmeta, *High-Integrity IMM-EKF-Based Road Vehicle Navigation with Low-cost GPS/SBAS/INS*, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2007.
- [Mud04] N. Mudaliar, D. Le Blanc and H. Peng. *Linear Estimation for Road Departure Warning Systems*. American Control Conference - Proceedings, Boston, 2004.
- [Ndj07] A. Ndjeng Ndjeng, S. Glaser and D. Gruyer, *A Multiple Model Localization System for Outdoor Vehicles*, IEEE/Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, June 2007.
- [Ndj08] A. Ndjeng Ndjeng, D. Gruyer and, S. Glaser *Low Cost Sensors Ego Localization with IMM Approach for unusual Maneuvers*, Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems IEEE/ITSC, Beijing, China, 2008.
- [Ned04] S. Nedevschi, R. Schmidt T. Graf, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, and C. Pocol, *3D lane detection system based on stereovision*, Intelligent Transportation Systems Proceedings, The 7th International IEEE Conference on Volume, Issue, 2004.
- [Ned04a] S. Nedevschi, R. Schmidt, T. Graf, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, and C. Pocol, *3D lane detection system based on stereovision*, Intelligent Transportation Systems, pp. 161-166, 3-6 Oct. 2004.
- [Ned04b] S. Nedevschi, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, C. Pocol, T. Graf, and R. Schmidt, *High accuracy stereovision approach for obstacle detection on non planar roads*, In Proceedings of the IEEE Intelligent Engineering Systems, Cluj Napoca, Romania, September 2004.
- [Nij82] H. Nijmeijer. *Observability of autonomous discret-time nonlinear systems : a geometric approach*, Internationel Journal of Control, 1982.
- [Nij90] H. Nijmeijer and A.J. Van der Schaft, *Nonlinear dynamical control systems*. Springer-Verlag, 1990.
- [Nou02] L. Nouveliere, *Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse*. Thèse, Université de Versailles saint Quentin en Yvelines, France, 2002.
- [Ols00] C.F. Olson, *Probabilistic Self-Localization for Mobile Robot*, IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol 16, February 2000.

Bibliographie

- [Oni06] ONISR, *Les grandes données de l'accidentologie 2005*. In Rapport ONISR www.securiteroutiere.gouv.fr/infos-ref/observatoire/accidentologie/, 2006.
- [Pac79] H.B. Pacejka, *Tire factors and vehicle handling*, journal Vehicle Design, vol. 1 (1-23), 1979.
- [Pac87] , H.B. Pacejka. E. Bakker. and L. Nyborg. *Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies*. SAE paper N°870421, 1987.
- [Pac91] H.B. Pacejka and E. Bakker, *The magic formula tyre model*. Proceedings, Ist International Colloq on Tyre models for vehicle dynamics analysis, 1991.
- [Pac96] H.B. Pacejka, *The tyre as a vehicle component*. In proceedings of the 26th FISITA congress : Engineering challenge human friendly vehicles, Prague, 1996.
- [Per08] M. PERROLLAZ *Détection d'obstacle multi-capteurs supervisés par stéréovision*, Thèse, Université Paris-VI, France, 2008.
- [Pom05] D. Pomerleau, *RALPH : Rapidly Adapting Lateral Position Handler*, In Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, 1995.
- [Rab05] A. Rabhi, N.K. M'Sirdi and M. Ouladsine, *Robust Estimation of Tyre Road Frictions and Contact Forces* International Mediterranean Modeling Multiconference, Marseille, France, 2005.
- [Rab05a] A. Rabhi, N.K. M'Sirdi and M. Ouladsine, *Robust Estimation of Tyre Road Frictions and Contact Forces* International Mediterranean Modeling Multiconference, Marseille, France, 2005.
- [Rab05b] A. Rabhi, *Estimation de la Dynamique du Véhicule en Interaction avec son Environnement*. Thèse, Université de Versailles-Saint-quentin-en-Yvelines, France, December 2005.
- [Raj06] Rajesh Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Livre, Springer science, imprimé par acid-free paper, États-unis, 2006.
- [Rei01] J. Reimpell, H. Stoll J.W. Betzler *The Automotive Chassis : Engineering Principles (SECOND EDITION)*, Livre, Publier par Butterworth-Heinemann, 2001.
- [Ryu04] J. Ryu *Stat and parameter estimation for vehicle dynamics control using GPS*, Thèse, Université de Stanford, État-unis, 2004.
- [Ryu04b] J. Ryu and J.C. Gerdes. *Estimation of Vehicle Roll and Road Bank Angle*. American Control Conference, Boston, MA, 2004.
- [Sat04] M. SATRIA, M. C. BEST. *State estimation of vehicle handling dynamics using non-linear robust extended adaptive Kalman filter*. Vehicle System Dynamics, Vol.41, pp. 103-112, 2004
- [Sco04] J. Scordia, *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*, thèse, Université de Nancy-1, France, 2004.
- [Sco06] Thomas B. Schon, Andreas Eidehall, Fredrik Gustafsson, *Lane departure detection for improved road geometry estimation*, Intelligent Vehicles Symposium IEEE, Tokyo, 2006.
- [Seb08] Yazid Sebsadji, Sébastien Glaser and Saïd Mammar, *Vehicle Roll and Road Bank Angle Estimation*. IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 2008.
- [Seb08b] Y. Sebsadji, S. Glaser, S. Mammar et J. Dakhlallah *Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation*, American Control Conference, Seattle, Washington, Etats unis, Juin, 2008.

-
- [Seb08c] Sebsadji Y., Benmansour N., Glaser S., Mammar S., *3D Estimation of Road Cartography using Vehicle Localization and Observers*, IEEE International Conference on Control Automation Robotic and Vision, Hanoi, Vietnam, Dec 2008.
- [Seb08d] Yazid Sebsadji, Sébastien Glaser and Saïd Mammar, *Estimation en Temps Réel des Angles de Tangage et de Roulis du Véhicule.*, Conférence Internationale Francophone, Roumanie 2008.
- [Seb09] Y. Sebsadji, N. Benmansour, S. Glaser, S. Mammar and D. Aubert 3D Reconstruction of the Road Geometry by Embedded Stereovision and Observers, International Association for Vehicle System Dynamics, Stockholm, Suède, 2009.
- [Sen06] C. Sentouh, S. Glaser S. Mammar and Y. Bestaoui. *Estimation des paramètres d'un modèle dynamique de véhicule par filtrage de Kalman étendu*. Conférence Internationale Francophone d'Automatique, France, 2006.
- [Sen07] C. Sentouh, Y. Sebsadji, S. Glaser and S. Mammar, *Road Bank Angle and Faults Estimation Using Unknown Input Proportional-Integral observer*. ECC paper, July 2007.
- [Sen07b] C. Sentouh, *Analyse du risque et détection de situations limites : Application au développement des systèmes d'alerte au conducteur*, thèse, université d'Evry Val d'Essonne, France, 2007.
- [SET00a] SETRA-BRENAC, *Relations vitesse, courbure, devers*. Note technique, 2000.
- [SET00b] SETRA-ICTAAL. *Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison*, Réf B0103, décembre 2000.
- [SET02] SETRA, *Traitemet des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération*, Guide technique, Réf E0233, novembre 2002.
- [SET06] SETRA, *Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes*, guide technique, 2006.
- [SET86] SETRA, *Vitesses pratiquées et géométrie de la route*. Note d'information n°10, série circulation sécurité exploitation, Réf E861, avril 1986.
- [SET94] SETRA, *Recommandations techniques pour la conception générale et la géometrie de la route. Aménagement des routes principales (sauf les autoroutes et routes express à deux chaussées)*, guide technique, Réf B9413, 1994.
- [Sha85] B. Shafai et R.L. Caroll, *Design of Proportional Integral Observer for Linear Time Varying Multivariable Systems*, Proc. of the 24th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 597-599, 1985.
- [Sho07] Shou-tao peng, Chau-chin chang and Jer-jia sheu *On robust bounded control of the combined wheel slip with integral compensation for an autonomous 4WS4WD vehicle*, International Symposium on Advanced VEhicle Control, AVEC, Chine, 2007.
- [Sim04] N. Simond, and P. Rives, *Détection robuste du plan de la route en milieu urbain*, 14ème Congrès Francophone de Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle, RFIA'04, Toulouse, France, 2004.
- [Sté02] J. Stéphant, A. Charara, and D. Meizel. *Force model comparaison on the wheel-ground contact for vehicle dynamics*. In Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium. IEEE paper, 2002.
- [Sté03] J. Stéphant, A. Charara, and D. Meizel. *Observateurs non-linéaires pour l'angle de dérive d'une automobile*. In Journées Automatique et Automobile, 2003.

Bibliographie

- [Sté04a] J. Stéphant and A. Charara. *Virtual sensor : Application to vehicle sideslip angle and transversal forces*. In IEEE Transactions on industrial electronics, 2004.
- [Sté04b] J. Stéphant. *Contribution à la validation expérimentale d'observateurs appliqués à la dynamique du véhicule*. PhD thesis. Université de Technologie Compiègne, 2004.
- [The05] J. Theys *Quelles technologies-clefs pour l'Europe ? : (Les enjeux liés aux transports)* Rapport No. DRAST-CPVST-05-03 du Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Centre de prospective et de veille scientifique, Puteaux, France (Commanditaire) Commission Européenne, Direction Générale de la Recherche, Luxembourg, 2005.
- [Tse01] H.E. Tseng, *Dynamic estimation of road bank angle*, Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), Ann Arbor, Michigan, USA, pp.421-428, 2001.
- [Tse07] H.E. Tseng, L.Xu and D. Hrovat, *Estimation of land vehicle and pitch angle*, Journal Vehicle system dynamics, Vol 45, 433-443, 2007.
- [Tse99] H.E. Tseng, B. Achrafi, D.Madau, T. Brown et D. recker, *Development of vehicle stability control at ford*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol 4, pp 223-234, 1999.
- [Ven03] G. Venture, *Identification des paramètres dynamiques d une voiture*, PhD thesis, École centrale de Nantes et Université de Nantes, France, 2003.
- [Wan02] R. Wang, Y. Xu, Libin, and Y. Zhao, *A Vision-Based Road Edge Detection Algorithm*, In Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Versailles, France, June 2002.
- [Woj78] B. Wojciechowski, *Analysis and synthesis of proportional-integral observers for single-input-single-output time-invariant continuous systems*, PhD thesis, Gliwice, Poland, 1978.
- [Zem07] *Sur l'observation de l'état des systèmes dynamiques non linéaires*, Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2007.