



Coopération Homme Machine pour la conduite automatisée : une approche par partage haptique du contrôle

Boussaad Soualmi

► To cite this version:

Boussaad Soualmi. Coopération Homme Machine pour la conduite automatisée : une approche par partage haptique du contrôle. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2014. Français. NNT : . tel-01122903

HAL Id: tel-01122903

<https://hal.science/tel-01122903>

Submitted on 4 Mar 2015

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

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



Université
de Valenciennes
et du Hainaut-Cambresis



Thèse de doctorat

Pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de
Valenciennes et du Hainaut-Cambresis

ÉCOLE DOCTORALE SPI

Préparée au LAMIH

Présentée et soutenue par

Boussaad SOUALMI

**Coopération Homme-Machine pour la conduite automatisée :
une approche par partage haptique du contrôle**

soutenue le 16 Janvier 2014

Jury :

<i>Président :</i>	Philippe CHEVREL	Professeur, École des Mines de Nantes
<i>Rapporteurs :</i>	Michel BASSET	Professeur, ENSISA
	Saïd MAMMAR	Professeur, Université d'Evry Val d'Essonne
<i>Examineurs :</i>	Serge BOVERIE	HDR, Continental Automotive
<i>Invité :</i>	Serge DEBERNARD	Professeur, UVHC
<i>Directeur :</i>	Jean Christophe POPIEUL	Professeur, UVHC
<i>Encadrant :</i>	Chouki SENTOUH	Maître de Conférences, UVHC

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants de thèse M. Jean-Christophe POPIEUL "familièrement JC", professeur à l'ENSIAME et M. Chouki SENTOUH, Maître de conférence à l'ISTV, qui m'ont accueilli au sein de l'équipe ASHM et aidés avec leurs conseils et ont toujours su apporter leur soutien scientifique et moral. Je les remercie également pour leurs valeurs *humaines* et leur bonne humeur qui font de chaque rencontre des moments très agréables car c'est probablement ces qualités qui ont fait que ces trois ans ont été un réel plaisir. Et aussi, je leur témoigne une grande reconnaissance puisque c'est grâce à eux que j'ai intégré aujourd'hui l'IRT SystemX.

Je remercie M. Saïd MAMMAR professeur à l'université d'Evry Val d'Essonne et M. Michel BASSET, professeur à ENSISA, qui ont rapporté ce mémoire et fait part de leurs remarques et critiques constructives.

Je remercie M. Philippe CHEVREL, Professeur à l'école des Mines de Nantes, d'avoir présidé le jury.

Je remercie M. Serge DEBERNARD, professeur à l'ISTV, qui, durant ces trois années, a participé au projet ABV, contribué à ce travail par ses conseils et critiques et d'avoir accepté de faire partie du jury pour partager ses remarques.

Je remercie aussi M. Serge BOVERIE, HDR Continental Automotive, qui a fait partie du jury et sa double vision de scientifique et d'industriel qui au travers de ses questions et remarques a permis d'améliorer ce travail ainsi que la qualité du manuscrit.

Je remercie bien évidemment Jérôme FLORIS l'ingénieur d'exploitation du simulateur SHERPA qui arrive toujours à trouver une solution lorsque l'on trouve une "surprise" dans le simulateur surtout la veille d'une demo. Sans oublier Phillipe SIMON expert d'oculométrie et Thierry POULAIN réalisateur du circuit intégré sur le simulateur et qui, pour remonter le moral, a toujours une blague.

Je remercie tout le personnel du LAMIH : son directeur Thierry Marie GUERRA "TMG". Les secrétaires Isabelle, Sylvie, Marlene, Melanie...

Je remercie tout mes collègues venus des quatre coins du monde : Ahn-Tu (Vietnam) et Jérémy (France) avec qui j'ai partagé plein de moments agréables, Milka (Bulgarie), Abel (Burkina Faso), Ala de Syrie, Amale et Raymond (Liban), Rasul (Iran), Victor & Raymondo du Mexique, Benyamine, Djamel et Farid d'Algérie, sans oublié Rémy, Jimmy, Simon, Mapy, Igor, Bako, Laurent ...

Je n'oublierai pas le soutien de ma famille en particulier mes deux frères Amara et Mahdi ainsi que ma belle sœur Melisa. A côté d'eux je n'oublierai pas, non plus, celui de Massinissa BELLACHE et Chabane SIDER qui m'ont accueilli et beaucoup aidé durant ma première année en France.

Je ne pourrai finir ce paragraphe sans remercier celle qui m'a soutenu et encouragé jusqu'à la dernière minute, oui je pense à toi ma chère Zhoulikha "Zouzou".

Je remercie également l'ensemble du personnel du LAMIH en particulier et de l'UVHC en

général, de la direction aux agents d'entretien.

Glossaire

Notations

Symbole	Dénomination
$X > 0, X < 0$	Matrice définie positive, respectivement négative.
$R^a : O_a X_a Y_a Z_a$	Repère absolu considéré galiléen
$R^v : O_v X_v Y_v Z_v$	Repère véhicule.
m	Masse du véhicule.
I_z	Moment d'inertie de lacet du véhicule.
l_f	Distance du centre de gravité à l'essieu avant.
l_r	Distance du centre de gravité à l'essieu arrière.
d	Largeur des essieux.
η_t	Chasse géométrique.
R_s	Rapport de réduction de la direction.
I_s	Moment d'inertie de la colonne de direction.
B_s	Coefficient d'amortissement de la colonne de direction.
C_f	Coefficient de raideur des roues avants.
C_r	Coefficient de raideur des roues arrières.
μ	Coefficient d'adhérence.
l_d	Distance de visée du conducteur.
l_s	Distance de visée du système de vision du véhicule.
ψ	Angle de lacet.
ψ_L	Angle de cap relatif.
y_L	Écart latéral par rapport au centre de la voie à une distance l_s à l'avant du véhicule.
y_c	Écart latéral par rapport au centre de la voie calculé au centre de gravité du véhicule.
v_x	Vitesse longitudinale du véhicule.
v_y	Vitesse latérale du véhicule.
r	Vitesse du lacet du véhicule.

T_d	couple de braquage du conducteur.
T_c	couple de braquage du contrôleur.
ρ	paramètre variant.
κ	Courbure de la route.

Table des matières

1	Introduction Générale	1
2	État de l’art	7
2.1	Introduction	7
2.2	Systèmes d’aide à la conduite	8
2.2.1	Activité de conduite automobile	8
2.2.2	Évolutions techniques contribuant à la réalisation d’ADAS	9
2.3	Émergence des systèmes d’aide à la conduite	12
2.4	Systèmes de stabilisation du véhicule	12
2.5	Systèmes d’alerte au conducteur	14
2.6	Systèmes actifs d’aide à la conduite	16
2.6.1	Assistance au contrôle longitudinal	16
2.6.2	Assistance au contrôle latéral	18
2.7	Les problèmes liés à l’automatisation	20
2.8	Coopération dans la conduite automobile	21
2.8.1	Coopération au niveau de l’action	24
2.8.2	Coopération au niveau du guidage	28
2.9	Réalisations industrielles	29
2.10	Notre conception d’une coopération dans la conduite	30
2.11	Conclusion	32
3	Modélisation du véhicule et environnement SHERPA	33
3.1	Introduction	33
3.2	Mouvements du véhicule	34
3.3	Forces et moments extérieurs agissant sur le véhicule	37
3.3.1	Origine des forces longitudinales et latérale	38
3.3.1.1	Angle de dérive d’un pneumatique	39
3.3.1.2	Taux de glissement	40
3.3.2	Modèle d’efforts de Coulomb/Burckhardt	40
3.3.3	Modèle de Pacejka	41
3.4	Expressions du modèle de véhicule simplifié	42

3.4.1	Positionnement latéral du véhicule sur la route	43
3.4.2	Système de direction avec assistance électrique	44
3.4.3	Modèle bicyclette du véhicule sur la route	46
3.5	Modèle conducteur pour le suivi de voie	47
3.6	Présentation de l'environnement de travail SHERPA	49
3.6.1	Outils pour la mise au point des "scénarios"	52
3.6.2	Outils pour l'analyse du comportement des conducteurs	53
3.6.3	Circuit de test de conduite	53
3.7	Validation du modèle véhicule adopté sur SHERPA-LAMIH	54
3.8	Conclusion	56
4	Commande type TS pour le maintien de voie	59
4.1	Introduction	59
4.2	Préliminaires sur les modélisations Takagi-Sugeno	60
4.2.1	Construction de modèles TS	62
4.2.2	Quelques lemmes utiles	63
4.3	Représentation TS du modèle du véhicule	64
4.3.1	Validation du modèle TS du véhicule	65
4.3.1.1	Validation en simulation	65
4.3.1.2	Validation sur des données collectées sur SHERPA	67
4.4	Stabilité et stabilisation d'un modèle TS	69
4.4.1	Stabilité d'un modèle TS	69
4.4.2	Stabilisation d'un modèle TS	71
4.4.3	Problème de régulation	72
4.5	Commande TS pour un maintien de voie	75
4.6	Robustesse du contrôleur	79
4.6.1	Rejet d'une perturbation	80
4.7	Conclusion	80
5	Partage haptique de la conduite	83
5.1	Introduction	84
5.2	Conduite avec un contrôleur de maintien de voie : Problématique de partage	85
5.2.1	Scénarios de mise en situation	85
5.2.2	Résultats des simulations numériques	86
5.3	Partage haptique du contrôle latéral	87
5.3.1	Partage du contrôle par pondération	88
5.3.1.1	Validation en simulations numériques	89
5.3.2	Le partage comme l'un des objectifs du E-copilote	90
5.3.2.1	Modèle conducteur simplifié pour le suivi de voie	90
5.3.2.2	Synthèse du contrôleur intégrant le modèle conducteur	91

5.3.3	Validation de l'approche proposée en simulations numériques	96
5.4	Validations sur le simulateur de conduite SHERPA	97
5.4.1	Conduite avec E-copilote1	97
5.4.2	Conduite avec E-copilote1 pondéré : partage par pondération	97
5.4.3	Partage de conduite avec E-copilote2	98
5.5	Synthèse et discussion	101
5.5.1	Discussions des performances de maintien voie	102
5.5.2	Discussion sur "la qualité" du partage	104
5.6	Partage avec retour sur le Haut Niveau de Coopération (HNC)	107
5.6.1	Partage haptique avec retour sur le choix de la trajectoire	107
5.6.1.1	Simulations numériques	108
5.6.2	Simulation interactive avec retour sur le choix de la trajectoire	109
5.7	Conclusion	109
6	Perspectives d'intégration : Développement d'un observateur et schéma global de fonctionnement	111
6.1	Introduction	112
6.2	Observateur TS à entrée inconnue	113
6.2.1	Application pour l'estimation de la dynamique latérale du véhicule et du couple conducteur	115
6.2.1.1	Observabilité du modèle considéré	116
6.2.1.2	Résultats de simulations numériques	117
6.2.2	La région $\mathcal{D}$ -Stabilité et le placement de pôles LMI	117
6.2.2.1	La région LMI et $\mathcal{D}$ -Stabilité	117
6.2.3	Placement de pôles de l'observateur TS	120
6.3	Validation en simulations numériques	120
6.4	Intégration de l'observateur dans la boucle de commande	124
6.5	Validation de l'observateur sur le simulateur SHERPA-LAMIH	128
6.6	Intégration du système global dans le simulateur SHERPA	132
6.6.1	Interface graphique du prototype	135
6.7	Conclusion	138
7	Conclusion générale	141
A	Annexe	157
A.1	Modélisation de la chaîne de traction du véhicule [96] [12]	157
A.2	Paramètres du véhicule	158
		159

Table des figures

1.1 Répartition des tâches et partenaires porteurs de chacune d'elles dans le projet ABV.	2
2.1 Décomposition hiérarchique de l'activité de conduite [90, 72]	8
2.2 Capteurs extéroceptifs du véhicule	10
2.3 La mécatronique dans l'automobile [60]	11
2.4 Système de direction filo-commandée [5]	11
2.5 Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système de stabilisation	13
2.6 Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système de stabilisation et un système d'alerte au conducteur	14
2.7 Architecture d'un système d'alerte au conducteur proposée dans [123]	15
2.8 Système AFIL de PSA Peugeot Citroën [18]	16
2.9 Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système actif d'aide	17
2.10 Diagramme de phase interdistance /vitesse relative [118]	18
2.11 Image du champ potentiel en 2D et la structure de commande proposée dans [112].	19
2.12 Les niveaux d'assistance au conducteur dans HAVEit [20]	22
2.13 La dynamique du niveau d'assistance au conducteur en fonction de l'état de conducteur vue par HAVEit [20]	23
2.14 Architecture globale d'une coopération dans la conduite [44]	24
2.15 Conduite partagée comme système hybride (switch) [34]	25
2.16 Architecture de partage du contrôle latéral proposée dans [11]	25
2.17 Schématisation d'un contrôle partagé haptique [2]	27
2.18 Coopération par pondération des actions [15]	27
2.19 Architecture de coopération conducteur/assistance [8]	29
2.20 Principe de fonctionnement de HiDS	29
2.21 Architecture du système d'aide proposé par Ford [26]	30
2.22 Les différents interactions entre le cavalier et son cheval [36]	31
2.23 Architecture globale de la coopération conducteur-assistance adoptée	32

3.1	Degrés de liberté des mouvements du véhicule.	35
3.2	Les différents repères pour la dynamique du véhicule.	36
3.3	Allure de la force longitudinale latérale d'un pneumatique en fonction de son angle de dérive.	38
3.4	Angle de dérive d'un pneumatique et les forces longitudinale et latérale résultantes [126].	39
3.5	Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka [123]	41
3.6	Représentation du modèle bicyclette à partir d'un modèle quatre roues.	42
3.7	Positionnement du véhicule sur la voie de circulation	44
3.8	Représentation d'un système de direction assistée	45
3.9	Point d'application de la force latérale d'un pneumatique [109] [107]	46
3.10	Schéma des angles visuels utilisés par le conducteur pour le maintien de voie [120]	48
3.11	Structure du modèle conducteur pour le maintien de voie proposé dans [120]	48
3.12	Le simulateur SHERPA-LAMIH	50
3.13	Architecture matérielle du SHERPA-LAMIH	51
3.14	Couplemètre et le Driver Monitoring équipant SHERPA-LAMIH	53
3.15	La piste d'essais de Satory et la courbure de ses virages	54
3.16	Comparaison des sorties du modèle véhicule proposé aux données collectées sur SHERPA-LAMIH	55
3.17	Erreur de reproduction du modèle proposé en comparaison des données collectées sur SHERPA-LAMIH	56
4.1	Schéma de comparaison du modèle véhicule (4.15) à sa représentation TS (4.16).	65
4.2	Comparaison des sorties du modèle véhicule (4.15) à celles de sa représentation TS (4.16).	66
4.3	Erreur d'approximation du modèle véhicule (4.15) par sa représentation TS (4.16).	67
4.4	Comparaison des sorties du modèle TS considéré (4.16) aux données collectées sur le simulateur	68
4.5	Erreur d'approximation du modèle ARHMM du simulateur de conduite SHERPA-LAMIH par la représentation TS (4.16)	69
4.6	Performances du contrôleur pour un maintien de voie en simulation numérique	76
4.7	Performances du contrôleur pour un maintien de voie obtenues sur le simulateur SHERPA	77
4.8	Trajectoire réalisée par le contrôleur sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH	78
4.9	Comparaison des performances du contrôleur TS proposé à celles des contrôleurs optimaux LQ obtenus pour une vitesse longitudinale constante ($v_x=7, 10$ et $16m/s$)	79
4.10	Rejet d'une perturbation en rafale de vent latéral	80
5.1	Configuration pour une seule trajectoire disponible.	85

5.2	Simulation d'un partage de la conduite entre le modèle conducteur et le contrôleur présentés dans le chapitre précédent pour une situation de suivi de voie puis d'évitement d'un obstacle.	86
5.3	Architecture de coopération avec pondération.	88
5.4	Couple de commande pondéré en fonction du couple de la commande et de celui du conducteur	89
5.5	Simulation numérique d'une conduite partagée avec pondération de l'action du E-copilote1.	90
5.6	Résultats de simulation de suivi de voie réalisé par le modèle conducteur simplifié (5.2).	92
5.7	Manœuvre d'évitement d'obstacle réalisée par : (I) Le modèle conducteur simplifié (5.2) en simulation numérique, (II) Un conducteur humain sur le simulateur SHERPA. (a) : Écart latéral (y_c), (b) : Couple de braquage du conducteur (T_d).	93
5.8	Comparaison des sorties du modèle C-V-R (5.4) à celles de sa représentation TS.	94
5.9	Erreur de reproduction des sorties du modèle original C-V-R (5.4) par sa représentation TS.	95
5.10	Résultats obtenus pour une conduite partagée en simulation numérique.	96
5.11	Conduite partagée entre un conducteur humain et le E-Copilote1 pour une situation de suivi de voie et d'évitement d'un obstacle.	98
5.12	Résultats obtenus sur SHERPA pour une conduite partagée avec E-copilote1 pondéré.	99
5.13	Résultats obtenus sur SHERPA pour une conduite partagée avec E-copilote2.	100
5.14	Résultats pour trois manœuvres successives d'évitement d'obstacle (double changements de voie) réalisées sur le SHERPA.	101
5.15	Performances réalisées en matière de maintien de voie en écart latéral maximal (à gauche) et l'effort consacré par le conducteur (à droite) en simulations numériques et interactives.	102
5.16	Effort du conducteur lors de la manœuvre de l'évitement d'obstacle (à gauche) et les valeurs du paramètre W_d pour les différentes stratégies de partage testées (à droite).	104
5.17	Comparaison de la manœuvre d'évitement d'obstacle lors de la conduite partagée ; à gauche : avec E-copilote1, à droite : avec E-copilote2.	106
5.18	Le cas où deux trajectoires de conduite sont disponibles.	107
5.19	Résultat de simulation pour un conduite partagée avec l'intervention du module HNC pour réaliser un évitement d'obstacle.	108
5.20	Séquence de changement de voie pour une conduite partagée avec intervention du HNC réalisée en interactive sur le simulateur SHERPA.	109
6.1	Schéma global d'observation et de commande	116

6.2	Evolution des variables du modèle véhicule et leur estimation par l'observateur obtenu en appliquant le résultat du théorème 6.2	118
6.3	La région $\mathcal{D}(\alpha, R, \theta)$ du plan complexe	119
6.4	Emplacement des pôles des sous-systèmes de l'observateur TS obtenu dans le plan complexe où P_i désigne les pôles du sous-système i	121
6.5	Évolution des variables du modèle véhicule et de leurs estimations obtenues en simulations numériques	122
6.6	Évolution des erreurs d'estimation des variables d'état et du couple de braquage du conducteur obtenues en simulations numériques avec un agrandissement sur la convergence à partir de l'état initial.	123
6.7	Résultats obtenus par la mise en cascade de l'observateur avec E-copilote2. . . .	125
6.8	Évolution des couples de la commande (T_c), du conducteur (T_d) et son estimation ($\hat{T}_d$) ainsi que des variables du modèle véhicule et de leurs estimations obtenues en simulation d'une conduite partagée avec E-copilote2.	126
6.9	Évolution des erreurs d'estimation obtenues en simulation, avec des agrandissements sur la convergence à partir des états initiaux pour une conduite partagée avec E-copilote2.	127
6.10	Validation de l'observateur sur des données collectées sur le simulateur SHERPA pour une conduite d'un conducteur humain avec E-copilote1	129
6.11	Erreur de l'estimation sur les différentes variables pour une validation sur une conduite avec E-copilote1 réalisée sur le simulateur SHERPA	130
6.12	Résultats de l'estimation sur le simulateur SHERPA lors d'une série de manœuvres d'évitement d'obstacles lors d'une conduite partagée entre le conducteur et copilote2	131
6.13	Graphe des états et transitions du système global.	133
6.14	Vue de l'interface sur le tableau de bord.	135
6.15	Ecran d'accueil.	136
6.16	Vue de l'interface en mode "Manuel".	136
6.17	Vue de l'interface lorsque le mode "LONGI" est engagé.	137
6.18	Indications sur la distance au véhicule leader affichées en mode "LONGI". . . .	137
6.19	Vue de l'interface en mode Complet (ABV).	138
6.20	Vue de l'interface en mode Complet (ABV) avec indication sur les voies interdites et des changements suggérés.	138

Chapitre 1

Introduction Générale

L'automobile est le moyen de transport le plus utilisé et le plus qui recueille la faveur des usagers dans les pays développés. Pour satisfaire les exigences de leurs clients en matière de sécurité et de confort, les constructeurs ont introduit de plus en plus d'équipements dans leurs véhicules : navigateur GPS¹, aide au stationnement...etc. L'apparition de ces nouvelles technologies au sein des habitacles est principalement rendue possible par les progrès réalisés dans plusieurs domaines, notamment : l'automatique, les télécommunications, le traitement du signal et de l'image, l'électronique... La baisse des coûts de l'électronique (capteurs, réseaux de télécommunication, calculateurs (ECU²)) conjointement à la miniaturisation, permettent d'intégrer dans les véhicules des fonctionnalités avancées. Il est devenu possible pour un coût raisonnable de communiquer, percevoir l'environnement, détecter les objets présents et évaluer une situation de conduite pour ainsi apporter une aide considérable au conducteur. L'intégration de certaines fonctionnalités comme l'ABS³ et l'ESP⁴, ont permis de renforcer la sécurité de l'automobile. Il n'en reste pas moins que, le nombre d'accidents sur la route est toujours élevé et que les dommages causés ont de lourdes conséquences pour les individus (3842 personnes tuées à 30 jours en 2012) et pour la société (23 Milliards d'euros rien qu'en France) [98].

Depuis les années 1980, de nombreux travaux de recherche menés à la fois chez les industriels et les académiques visent à développer des systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS). L'objectif est d'aider le conducteur qui est considéré comme responsable dans près de 95% des accidents ([73] P.13). Aujourd'hui, on parle de **l'automatisation complète de la conduite** et des véhicules prototypes existent déjà (Google car, par exemple). Néanmoins, automatiser totalement la conduite n'est pas sans risque. Une étude approfondie de cette nouvelle configuration de l'automobile (systèmes Homme-Machine) ainsi que des **interactions** entre le conducteur et le véhicule automatisé est nécessaire en amont. C'est dans cette optique qu'a été lancé le projet de recherche ABV (Automatisation Basse Vitesse).

1. Global Positioning System

2. Electronic Control Unit

3. Anti-lock Braking System

4. Electronic Stability Program

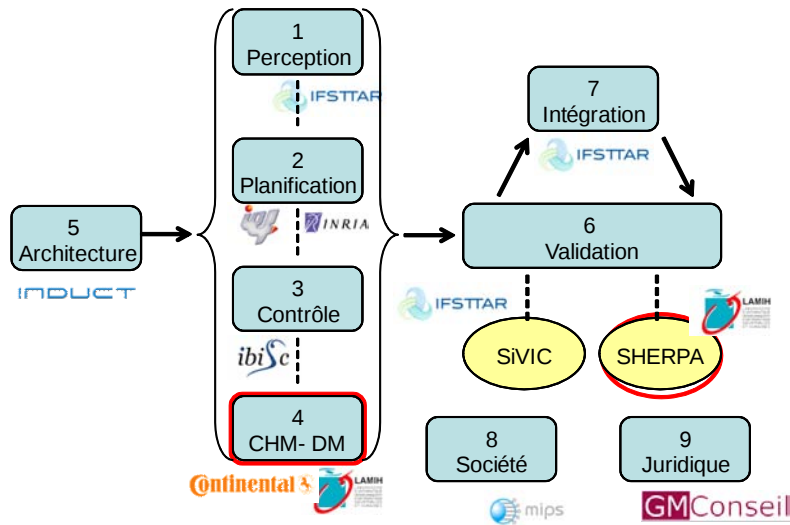


FIGURE 1.1 – Répartition des tâches et partenaires porteurs de chacune d’elles dans le projet ABV.

Cadre de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein de l’équipe ASHM (Automatique et systèmes Homme-Machine) du laboratoire LAMIH et s’inscrit dans le cadre du projet ANR : ABV. Le projet réunit onze partenaires travaillant sur les aspects entourant le véhicule automatisé : de la perception de l’environnement à l’impact juridique et social (la figure 1.1 récapitule l’organisation des tâches dans le projet ainsi que les partenaires responsables de chacune des tâches). Le but final visé par le projet est de développer un démonstrateur assurant la faisabilité de l’automatisation complète de la conduite du véhicule à basse vitesse (moins de 50km/h), dans un trafic mixte en prenant en compte **le conducteur** dans la boucle de conduite.

Le LAMIH et Continental Automotive pilotent la tâche 4 où sont impliqués également l’Ibisc, l’IFSTTAR et Véolia environnement. Cette tâche s’intitule ”Coopération Homme-Machine (CHM) et Driver Monitoring (DM). Elle vise à spécifier et prototyper dans un démonstrateur les interactions entre un conducteur et un automate pour le partage de la conduite en prenant en compte l’état de chacun des participants.

Problématique de la thèse

Au sein de ce projet global, ce mémoire traite plus particulièrement de l’aspect de partage de la conduite entre un conducteur humain et un copilote électronique capable de guider le véhicule sans intervention externe mais qui ne doit pas non plus rejeter le conducteur de la boucle de guidage du véhicule, si ce dernier souhaite intervenir dans le processus de conduite.

Durant la conduite, le conducteur positionne le véhicule sur la route en latéral tout en gérant le déplacement longitudinal. Pour assurer le guidage latéral du véhicule, le conducteur exerce un couple sur le volant et ainsi traduit ses intentions de déplacement en actions. L’introduction

d'un automate agissant, à son tour, sur le système de direction du véhicule modifiera l'activité de conduite et risque, dans certaines situations, de générer des interférences négatives avec le conducteur : des **conflits**. Dans certains cas, cela est sans risque pour la sécurité du conducteur : la manière d'aborder un virage, par exemple, n'est pas forcément la même pour le conducteur et l'automate, la divergence d'objectifs va affecter le confort mais pas la sécurité. Par contre, dans certaines situations, l'évitement d'un obstacle non détecté par l'automate par exemple, cela peut être beaucoup plus dangereux.

C'est la problématique à laquelle ce travail de recherche vise à contribuer. Plus particulièrement, ce mémoire aborde de façon privilégiée les situations de conduite où les deux intervenants n'ont pas le même objectif. Plus précisément, on examinera le cas où le conducteur souhaite s'écarter de la trajectoire (voie) cible du copilote. En prenant l'exemple de la situation d'évitement d'obstacle ci-dessus, il est évident qu'une solution doit être trouvée assez rapidement. L'objectif est que le copilote n'empêche pas le conducteur de réaliser sa manœuvre ou, mieux encore, l'aider à la réaliser.

En partant du principe qu'il nous est très difficile de connaître l'intention du conducteur avant qu'il ne la mette en œuvre, la meilleure solution est sans doute de considérer directement ses actions sur le volant : **son couple de braquage** pour aboutir à un partage de la conduite : "**le partage haptique**".

L'idée est de formaliser sous forme d'un problème d'automatique ce problème de partage du contrôle. Cette formalisation peut se faire sous forme d'un problème multi-objectifs, le premier étant de suivre une trajectoire cible (problème de maintien de voie) et le second étant de ne pas rejeter le conducteur dans le contrôle latéral du véhicule même lorsque l'on est en contradiction avec le premier objectif.

Dans un premier temps, l'idée que nous avons mise en avant est d'intégrer un modèle conducteur au modèle véhicule-route et ainsi avoir un contrôleur intégrant l'aspect du partage dans sa synthèse.

Dans un second temps, le partage est considéré au niveau hiérarchique plus élevé, en considérant qu'il est possible d'agir sur la trajectoire cible du copilote pour être en accord avec "l'intention" du conducteur.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

Chapitre 2 État de l'art : Ce chapitre est consacré à un état de l'art sur les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) ainsi que les travaux de recherche sur l'automatisation de la conduite dans le domaine de l'automobile. Nous revenons brièvement sur les différents systèmes d'aide en les classant selon leur nature, leur niveau d'intervention ainsi que leur niveau d'interaction avec le conducteur, puis nous discutons de la problématique de coopération entre un automate et un être humain en général puis dans le véhicule en particulier. En fin de chapitre, nous présenterons notre conception d'un système d'aide à la conduite coopérant avec le conducteur.

Chapitre 3 Modélisation du véhicule et environnement SHERPA : Ce chapitre présente le modèle véhicule qui sera utilisé pour les simulations numériques en vue d'un contrôle latéral. Ce modèle sera simplifié en posant certaines hypothèses non restrictives pour notre cas d'application pour la synthèse de lois de commande et d'observateurs. Le modèle conducteur qui sera utilisé pour les simulations numériques du partage du contrôle sera ensuite décrit. En fin du chapitre sera présenté le simulateur de conduite dynamique SHERPA-LAMIH utilisé dans ce projet suivi d'une validation du modèle véhicule adopté sur des données collectées sur le simulateur.

Chapitre 4 Commande type TS pour le maintien de voie : Ce chapitre est consacré à la technique de commande et d'observation adoptée dans ce travail. Il s'agit de la modélisation floue de type Takagi-Sugeno (TS). Nous rappelons les bases théoriques de cette technique ainsi que les avantages qu'elle présente. Le modèle du véhicule, introduit dans le chapitre 2, est représenté par un modèle TS reproduisant le comportement latéral du modèle original et prenant en compte la variation de la vitesse longitudinale. Par la suite, les techniques LMI seront utilisées pour la synthèse d'un contrôleur TS de suivi de voie.

Chapitre 5 Partage haptique de la conduite : Ce chapitre est consacré à la problématique du partage de contrôle entre le conducteur et un copilote en considérant le conducteur dans le boucle de commande via son couple de braquage. Deux solutions sont exposées. Nous discuterons également les résultats obtenus en simulation numérique et interactive des approches proposées. En fin de chapitre le partage de contrôle latéral est étendu au niveau décisionnel permettant de modifier la trajectoire cible du copilote.

Chapitre 6 Perspectives d'intégration : Développement d'un observateur et schéma global de fonctionnement : En vue d'une intégration sur un véhicule réel, ce chapitre présente de développement d'un observateur TS proportionnel multi-intégral permettant d'estimer les variables d'état du véhicule ainsi que le couple conducteur considéré comme entrée inconnue. En fin du chapitre l'architecture du système global intégré dans le simulateur SHERPA est présentée avec les différentes fonctionnalités qui ont été développées.

Conclusion générale et perspectives : Ce chapitre récapitule la démarche suivie dans ce mémoire pour l'élaboration d'un système d'aide au contrôle latéral du véhicule coopérant avec le conducteur et conclut sur les résultats obtenus. Il se termine en proposant des perspectives à ce travail pour de futures recherches.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revues internationales avec actes et comité de lecture

SOUALMI, B., SENTOUH, C., POPIEUL, J. C., et al. Automation-driver cooperative driving in presence of undetected obstacles. *Control Engineering Practice*, 2014, vol. 24, p. 106

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

1. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C. (2014). Both Vehicle State and Driver's Torque Estimation using Unknown Input Proportional Multi-Integral T-S Observer, 13th European Control Conference, june 24-27, Strasbourg , France.
2. SENTOUH C, SOUALMI B, POPIEUL J-C, DEBERNARD S (2013)., Cooperative Steering Assist Control System, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics , 13 to 16 October, Manchester, UK.
3. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2013). A shared control driving assistance system : interest of using a driver model in both lane keeping and obstacle avoidance situations. 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, August 11-15, 2013, Las Vegas, Nevada, USA
4. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2012). Fuzzy Takagi-Sugeno LQ controller for a lateral assistance control of a vehicle. The intelligent vehicles symposium (IV'12), June 3-7, 2012, Alcalá de Henares, Espagne.
5. SENTOUH C., SOUALMI B., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2011). The H2-Optimal Preview Controller for a Shared Lateral Control. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, october, Washington DC, USA.
6. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2011). Fuzzy Takagi-Sugeno LQ controller for a shared control of vehicle. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, october, Washington DC, USA
7. Do, A-L and Sename, O and Dugard, L and Soualmi, B (2011) Multi-objective optimization by genetic algorithms in H_∞ /LPV control of semi-active. 18th IFAC World Congress (IFAC WC 2011) 2011-08-28, Italie.

Conférences nationales avec actes et comité de lecture

1. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2013). Contrôleur flou T-S optimal pour une assistance à la conduit, 22eme rencontres francophones sur la logique floue et ses applications, 10-11 octobre, Reims.
2. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2012). Cooperation improvement of a T-S LQ controller for a shared lateral control of vehicle. Journées Automatique Automobile 2012, 23 et 24 mai, Versailles.

3. SOUALMI B., SENTOUH C., POPIEUL J-C., DEBERNARD S. (2011). Fuzzy Takagi-Sugeno LQ controller for the lateral control of vehicle. Journées Automatique Automobile 2011, 12 et 13 juillet, Bordeaux.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1	Introduction	7
2.2	Systèmes d'aide à la conduite	8
2.2.1	Activité de conduite automobile	8
2.2.2	Évolutions techniques contribuant à la réalisation d'ADAS	9
2.3	Émergence des systèmes d'aide à la conduite	12
2.4	Systèmes de stabilisation du véhicule	12
2.5	Systèmes d'alerte au conducteur	14
2.6	Systèmes actifs d'aide à la conduite	16
2.6.1	Assistance au contrôle longitudinal	16
2.6.2	Assistance au contrôle latéral	18
2.7	Les problèmes liés à l'automatisation	20
2.8	Coopération dans la conduite automobile	21
2.8.1	Coopération au niveau de l'action	24
2.8.2	Coopération au niveau du guidage	28
2.9	Réalisations industrielles	29
2.10	Notre conception d'une coopération dans la conduite	30
2.11	Conclusion	32

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à un état de l'art sur les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS : Advanced Driver Assistance Systems) dans le domaine de l'automobile. Un rappel sur la définition de l'activité de la conduite est donné dans la section 2.2.1 suivi par une présentation des avancées techniques réalisées dans le monde automobile qui ont contribué à l'émergence des ADAS. Dans la section 2.3, les ADAS sont classés selon la nature et le niveau de leur intervention : Les systèmes aidant à la stabilité du véhicule (section 2.4), ceux alertant le conducteur (section 2.5), et enfin, ceux qui interviennent directement sur le contrôle du véhicule (section

cette tâche a tendance à être extériorisée.

Le guidage : consiste à exécuter une trajectoire planifiée tout en s'adaptant aux conditions extérieures locales de l'environnement de conduite (conditions du trafic, état de la route ...etc). Cette tâche sollicite beaucoup la perception visuelle du conducteur pour appréhender l'environnement extérieur et adapter son style de conduite.

La stabilisation : tâche dont la fréquence de sollicitation de l'attention du conducteur est la plus élevée (et dont le niveau hiérarchique est le plus faible). Elle regroupe les actions de commande effectuées par le conducteur (braquages/accélérations) permettant de réaliser le guidage du véhicule dans un domaine de fonctionnement sûr en le maintenant sur la route.

Pour réaliser ces tâches, et plus particulièrement lors du guidage et de la stabilisation, le conducteur fait appel à quatre activités sous-jacentes : **la collecte d'informations, l'analyse des informations, la prise de décisions** et enfin **l'élaboration des actions de commande** [72].

D'après cette définition, on peut envisager différents niveaux où il est possible d'intervenir pour assister le conducteur, c'est ce qui fera l'objet de la section 2.3.

La première condition pour pouvoir mettre en œuvre des systèmes d'aide à la conduite, est que le véhicule soit équipé des moyens matériel et logiciel lui donnant les capacités de **percevoir** une situation de conduite, d'en **évaluer le risque**, de **décider** des éventuelles actions à réaliser et des actionneurs nécessaires à **la mise en œuvre de ces décisions**, mais aussi des moyens pour communiquer de façon claire les suggestions ou les actions entreprises pour aider le conducteur (**IHM : Interface Homme-Machine**).

Un bref exposé des avancées réalisées dans l'instrumentation du véhicule est donné dans le paragraphe qui suit.

2.2.2 Évolutions techniques contribuant à la réalisation d'ADAS

L'émergence des ADAS est due, en grande partie, aux progrès réalisés dans plusieurs domaines en relation avec l'automobile notamment : l'automatique, le traitement du signal, les télécommunications ainsi que les composants électroniques, surtout les ECU², de plus en plus petites avec un coût de moins en moins élevé [60].

Comme évoqué précédemment, percevoir l'environnement du véhicule est indispensable pour toute initiative d'apporter une aide au conducteur. La figure (2.2) donne un aperçu des différents capteurs pouvant équiper les véhicules pour la perception de l'environnement extérieur.

Ces progrès sur le plan matériel sont accompagnés de progrès logiciels avec le développement de nombreux algorithmes dédiés à la détection des marquages des voies, d'objets présents dans l'environnement (véhicules, piétons, obstacles...), à la reconnaissance des signalétiques de la

2. Electronic Control Unit

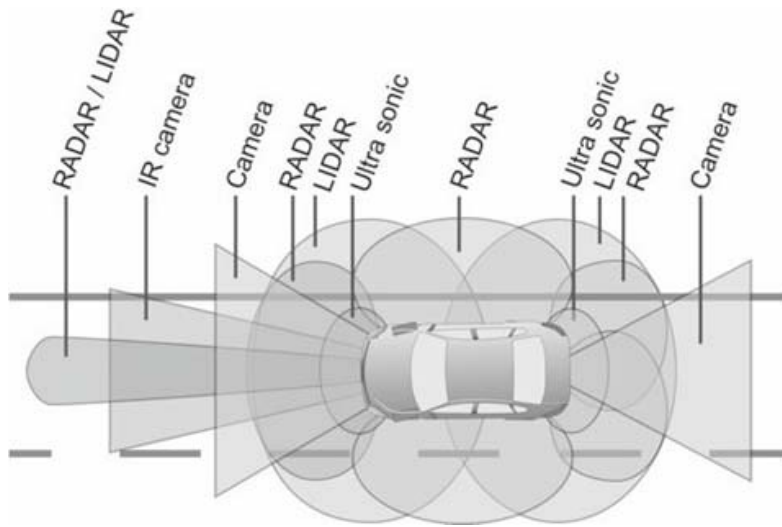


FIGURE 2.2 – Capteurs extéroceptifs du véhicule

route...etc.

Des algorithmes de détection de marquages basés sur le traitement d'images ont été développés, tout en assurant une certaine robustesse par rapport aux conditions atmosphériques et d'éclairage (brouillard, ombres, éblouissement ...) [66] [103] [110] [50] [74] [87]. La fusion de données multi-capteurs peut être utilisée afin d'augmenter la robustesse (fiabilité) de la détection [125] [13]. En ce qui concerne la localisation du véhicule sur la route, le module de positionnement consiste à utiliser un capteur de positionnement absolu tel le GPS et une base de données cartographique, pour une localisation dynamique à l'aide d'un algorithme basé sur la technique du Map-Matching [30]. Tous ces développements font que le véhicule peut être doté de capacités de perception qui peuvent être exploitées pour apporter une aide considérable au conducteur.

Une autre contribution, qui joue un rôle très important pour faciliter l'implémentation des systèmes d'aide à la conduite, est l'utilisation des actionneurs mécatroniques qui, de plus en plus, remplacent les actionneurs ou systèmes mécaniques conventionnels. Comme rapporté sur la figure 2.3, la tendance est de remplacer les liens mécaniques entre le conducteur et les actionneurs par des liens uniquement électriques, technique nommée le **X-by-Wire**. Cette solution présente de nombreux avantages et notamment la facilité de modélisation et de commande [60].

Le système de direction filo-commandée est une des très grandes réalisations de cette technologie [127, 21]. La figure 2.4 présente un exemple de ce type de système de direction (constructeur Nissan). Les éléments constituant le système de direction filo-commandée sont listés ci-dessous :

1. Capteur/actionneur de couple de braquage : Joue deux rôles, il envoie des consignes de braquage aux modules de contrôle (3) et restitue le couple d'auto-alignement au volant ;
2. Embrayage : la plupart du temps il est ouvert. En cas de défaut électronique/électrique il se referme, et donc restitue la liaison mécanique entre le volant et la crémaillère ;
3. Les modules de contrôle : ce trio contrôle les moteurs de l'assistance électrique et celui du volant. Ils agissent aussi comme des redondances pour des raisons de sécurité ;

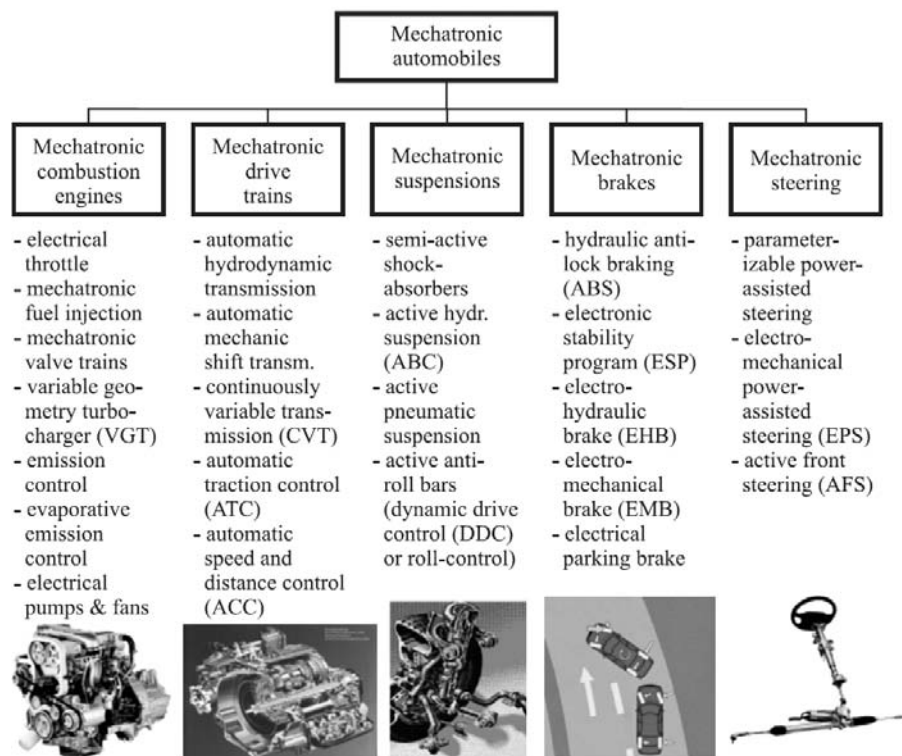


FIGURE 2.3 – La mécatronique dans l'automobile [60]



FIGURE 2.4 – Système de direction filo-commandée [5]

4. Les moteurs de l'assistance au braquage : deux petits moteurs sont utilisés pour braquer les roues avant du véhicule. Cette disposition permet de libérer un peu plus d'espace.

Ces systèmes de direction sont autorisés à la vente en Europe depuis 2005.

2.3 Émergence des systèmes d'aide à la conduite

Les ADAS sont aujourd'hui au centre de nombreux travaux de recherche tant en milieu universitaire que dans l'industrie.

Pour les constructeurs automobiles, outre l'aspect réglementaires qui rend obligatoire certains systèmes (ABS, ESP), les systèmes d'assistance à la conduite, par le gain en sécurité et en agrément de conduite qu'ils apportent, constituent un important argument commercial.

L'objectif principalement affiché est de réduire le nombre d'accidents routiers en allégeant la tâche de conduite pour le conducteur, et aussi réduire leur coût. A titre indicatif, en 2012 il y a eu 62250 accidents corporels dont 3560 accidents mortels avec **3842 personnes tuées** à trente jours pour un coût totalisant **23 milliards d'euros** rien qu'en France! [98]).

A l'image de l'activité de conduite décrite précédemment, ces systèmes adoptent de multiples formes et de multiples degrés d'assistance [35]. Comme classés dans [61], ces systèmes peuvent être regroupés en trois grandes catégories. Dans la première, sont regroupés les systèmes dont le rôle est de **stabiliser le véhicule** en cas de manœuvre extrême. La deuxième catégorie regroupe les systèmes permettant **d'alerter le conducteur** sur des situations de conduite dangereuses, et enfin, en dernier lieu, viennent les **systèmes agissant physiquement ou assumant en partie le contrôle du véhicule au niveau de son guidage**.

2.4 Systèmes de stabilisation du véhicule

Ces systèmes interviennent pour garder le véhicule contrôlable dans des manœuvres extrêmes. Une partie de ces systèmes ont pour rôle d'améliorer la liaison véhicule-route et éviter ou minimiser tout glissement pour assurer un maximum d'adhérence. Pour ce faire, les systèmes d'aide à la stabilisation du véhicule agissent à un bas niveau de la commande et sans interaction directe avec le conducteur (voir figure 2.5). Ces systèmes se contentent de mesures concernant uniquement le véhicule comme : l'accélération latérale, la vitesse de lacet, la vitesse de rotation de chacune des roues et la vitesse longitudinale du véhicule (une estimation).

C'est notamment le cas de l'ABS (Anti-lock Braking System) évitant le blocage des roues lors d'un fort freinage brusque ou sur une chaussée glissante. Outre la diminution de la distance de freinage, par rapport à un freinage avec blocage des roues, l'ABS permet, surtout, de garder la manœuvrabilité du véhicule par le conducteur pour permettre de corriger sa trajectoire. L'ESP/ESC (Electronic Stability Program/Control) limite le moment de lacet afin de garantir la stabilité du véhicule dans un virage ou lors d'une manœuvre d'évitement d'obstacle. Ce système, en mesurant l'angle de braquage appliqué par le conducteur et la vitesse du véhicule, exploite la fonction ABS pour freiner une roue et, ainsi, générer un moment de lacet stabilisant le véhicule [140]. Certains travaux proposent une correction de trajectoire du véhicule pour éviter une sortie de voie, hors les manœuvres extrêmes, en exploitant le freinage différentiel, ce qui donne une sorte d'ESP généralisé [106].

Autres exemples, le 4WS (Four Wheels Steering) optimise la trajectoire du véhicule dans un

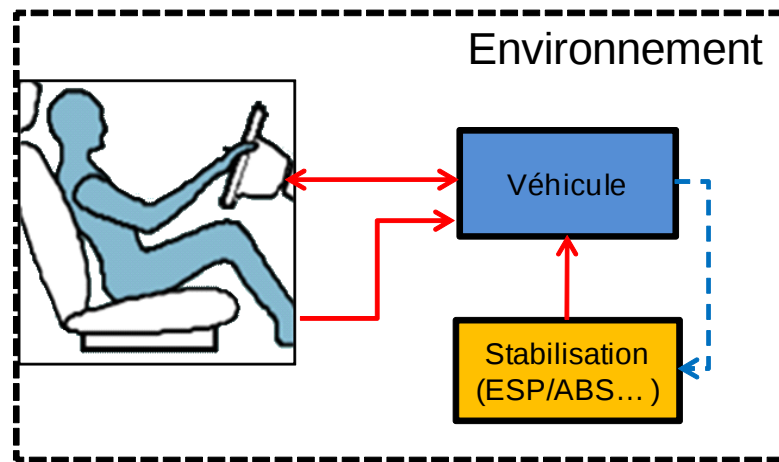


FIGURE 2.5 – Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système de stabilisation

virage avec les quatre roues directionnelles, l'ASR (Anti Slip Regulation) évite le patinage des roues motrices ...etc.

Ces systèmes surpassent même le conducteur humain dans de nombreuses situations (l'ABS correspond au fonctionnement de quatre pédales de freinage à haute fréquence, quelque chose qu'un être humain ne pourrait jamais faire) et sont largement acceptés par les utilisateurs [141]. Pour les deux systèmes ABS et ESP, les apports en termes de sécurité routière leurs ont valu d'être obligatoires sur les nouveaux véhicules à partir de 2007 et 2012 respectivement.

Des travaux proposent de compléter l'action du freinage différentiel, permettant un contrôle direct de lacet (Direct Yaw Control) par une action de braquage soit sur les roues avant (AFS : Active Front Steering) soit sur les roues arrière (ARS : Active Rear Steering) [119]. Cette action permet d'améliorer encore plus la stabilité de la dynamique latérale du véhicule [106].

Dans [28] puis dans [29] les auteurs proposent une commande LPV (Linear Parameter Varying) H_∞ pour l'amélioration de la stabilité du véhicule en agissant dans un premier temps sur l'angle de braquage avant, pour éviter la décélération du véhicule engendrée par le freinage, si cette action est insuffisante, un moment de lacet est généré par un freinage différentiel sur le train arrière. Le choix d'utiliser AFS et le freinage sur l'essieu arrière permet d'éviter l'interférence des actions de braquage et de freinage sur une même roue.

Malgré tous les avantages que présentent ces systèmes, ils n'interviennent qu'une fois le véhicule est dans une situation déjà dégradée et ne permettent pas d'anticiper une situation potentiellement dangereuse. Afin d'éviter de telles situations, une des solutions possibles, serait d'avertir le conducteur suffisamment à l'avance, sur une situation où il devra agir. Ceci fera l'objet de la section suivante.

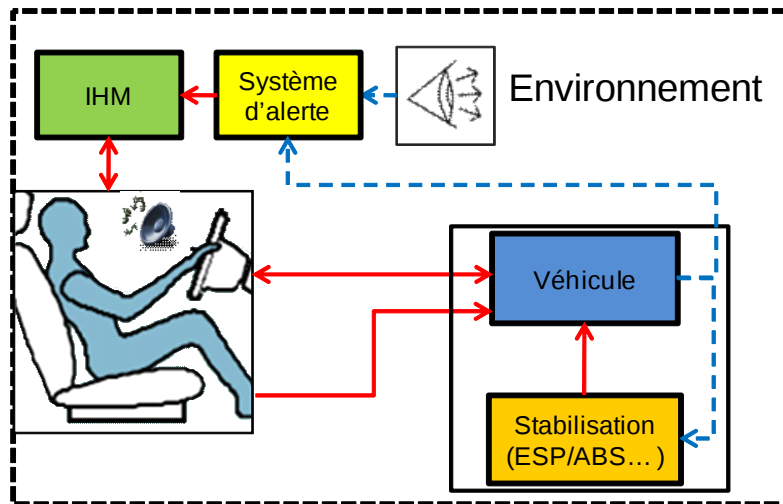


FIGURE 2.6 – Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système de stabilisation et un système d'alerte au conducteur

2.5 Systèmes d'alerte au conducteur

Parmi les premières solutions qui ont été testées pour alerter le conducteur d'un départ imminent de la route, on trouve, par exemple, l'utilisation de bandes rugueuses sur les accotements, notamment sur les autoroutes. Ces dernières permettent de faire vibrer le volant du véhicule et s'accompagnent d'un fort bruit de roulement, l'ensemble avertissant le conducteur. Bien que facile à mettre en œuvre, cette solution s'avère peu efficace puisque l'effet est ressenti au moment de la sortie de voie. Elle ne peut donc être utilisée que sur autoroute où la bande d'arrêt d'urgence donne au conducteur le temps de réagir. Comme alternative, plusieurs systèmes d'alerte actifs faisant appel aux moyens de détection et d'estimation de l'état du véhicule sur la route ont été développés [16] [68] [7][74][122] [123].

Afin d'évaluer une situation de conduite, plusieurs indicateurs de risque liés aux deux modes longitudinal et latéral sont utilisés dans la littérature. Certains indicateurs sont liés directement à la dynamique du véhicule (accélération latérale, vitesse de lacet,...etc.) et ainsi ne nécessitent que des capteurs proprioceptifs pour leur fonctionnement. D'autres, comme le temps à sortie de voie (le TLC), le temps avant une collision (le TTC)...etc nécessitent l'utilisation de capteurs extéroceptifs comme une caméra, un RADAR/Lidar, des capteurs ultrason...etc. (figure 2.2). Les mesures ne se limitent plus au seul véhicule, mais concernent également l'environnement dans lequel il évolue comme schématisé dans la figure (2.6).

La figure 2.7 rapporte une architecture plus détaillée d'un système d'alerte (proposée dans [123]), avec une mise en évidence des différentes parties le composant.

Pour alerter le conducteur sur un départ imminent de la voie, plusieurs types d'alertes peuvent être utilisés : alertes sonores, visuelles et/ou haptiques, ou une combinaison de ces trois types. Dans l'étude réalisée dans [55] puis [94], il a été démontré que les alertes fournies au conducteur via un signal haptique de type "motor priming" (PM) ; vibrations asymétriques

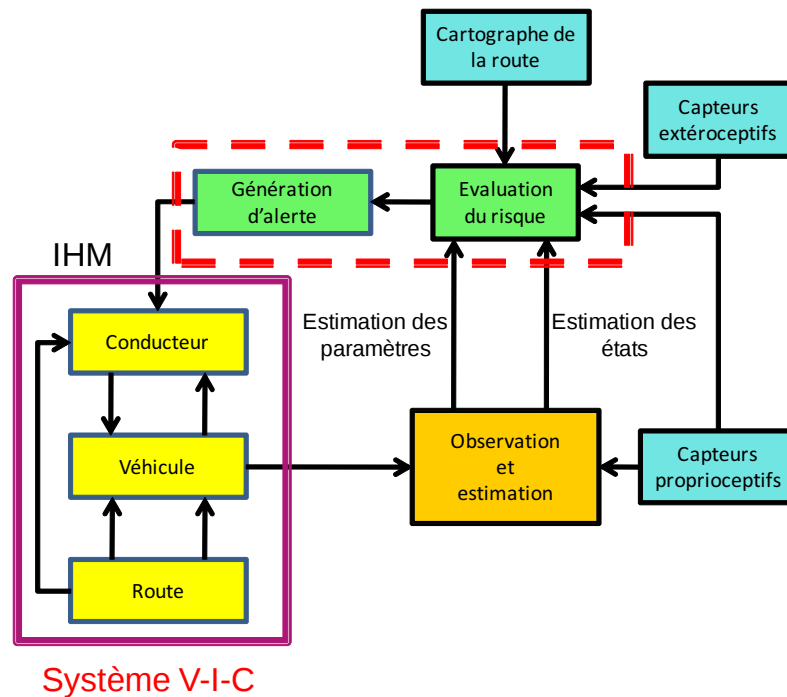


FIGURE 2.7 – Architecture d'un système d'alerte au conducteur proposée dans [123]

au volant l'incitant à revenir au centre de la voie, sont plus efficaces et que les conducteurs réagissent plus rapidement que dans le cas d'alertes sonores. Par contre, les conducteurs préfèrent les alertes sonores. Les auteurs de [94] suggèrent une combinaison des deux types d'alertes (sonore et PM) pour tirer les avantages de chacune.

Parmi les réalisations industrielles, on peut citer le système AFIL (Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne) développé et commercialisé par CITROËN en 2004. Ce système détecte une sortie de voie involontaire sur autoroute et voie rapide. Son principe de fonctionnement est basé sur la détection des marquages sur la voie à l'aide de capteurs infrarouges, implantés derrière le bouclier avant (figure 2.8). Dès que la trajectoire du véhicule dérive par rapport au centre de la voie et franchit le marquage, si la vitesse du véhicule est supérieure à 80 km/h alors le système entre en action. Dans le cas d'un changement de voie, le système détecte l'intention du conducteur en vérifiant l'état du clignotant (actionné ou pas). Le conducteur est alerté via des vibrations au niveau de l'assise du siège, sur le même côté où le franchissement de la ligne s'est produit.

Le défaut majeur des systèmes d'alerte reste leur inefficacité dans le cas où le conducteur n'assimile pas ou ne réagit pas à temps pour éviter un risque, dans ce cas une intervention pour récupérer la situation est souhaitable, c'est l'objet de la prochaine section.



FIGURE 2.8 – Système AFIL de PSA Peugeot Citroën [18]

2.6 Systèmes actifs d'aide à la conduite

Les systèmes actifs d'assistance à la conduite (copilote électronique), qui n'étaient utilisés auparavant que dans l'aviation, sont de plus en plus présents dans le domaine de l'automobile. Dans la littérature, plusieurs travaux ont déjà été menés, se fixant comme objectifs l'automatisation de la conduite et ainsi d'apaiser le conducteur dans la tâche de conduite et d'augmenter la sécurité routière.

La figure 2.9 décrit le système global "Conducteur-Véhicule-Environnement (C-V-E)" pour un véhicule équipé d'un système actif d'aide à la conduite. Ce dernier combine les mesures relatives au véhicule (pour la stabilisation) et celles relatives à l'environnement externe pour le guidage et la navigation.

On peut distinguer deux types de systèmes actifs d'aide à la conduite, un premier, agissant sur la dynamique longitudinale du véhicule (vitesse, accélération, freinage) et un second agissant sur la dynamique latérale (mouvement de lacet et/ou braquage).

2.6.1 Assistance au contrôle longitudinal

Le contrôle longitudinal fait référence à toute commande visant le déplacement longitudinal du véhicule (inter-distance véhiculaire, régulation de la vitesse) et les actionneurs concernés dans ce type d'assistance sont l'accélérateur et les freins. Les objectifs visés par le contrôle longitudinal sont : assurer une vitesse de croisière adaptée, garder une inter-distance garantissant une bonne marge de sécurité et assurer le confort en limitant les accélérations /décélérations et/ou le jerk (secousse).

Un élément important pour la mise en œuvre d'une assistance au contrôle longitudinal est la boîte de vitesse automatique. Elle même étant d'une grande utilité, surtout lors de la conduite en ville, puisqu'elle permet de décharger le conducteur de la réalisation des changements de rapports. Le plus ancien système de régulation de la vitesse de croisière du véhicule se nomme le "Cruise Control" (CC). Il permet de maintenir la vitesse du véhicule spécifiée par le conducteur.

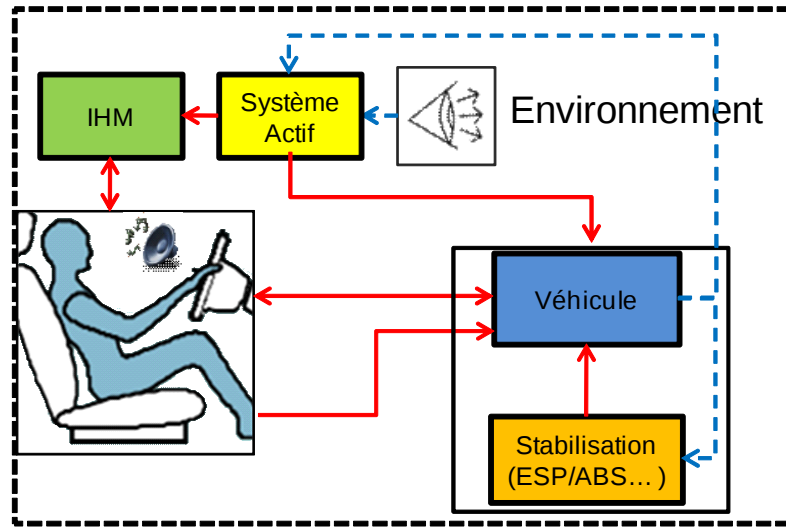


FIGURE 2.9 – Schématisation du système global "Conducteur-Véhicule-Environnement" avec un système actif d'aide

Ce système est très approprié pour la conduite sur autoroute ou sur des routes où le trafic est léger. Une version améliorée de ce système est l'ACC (Adaptive Cruise Control). A l'aide d'un RADAR la distance et la vitesse relative au véhicule leader est mesurée et en utilisant un modèle de distance (temps) de sécurité, l'ACC adapte la vitesse de croisière du véhicule de telle sorte à garder cette distance (ce temps) constante. La Figure 2.10 montre le diagramme de phase inter-distance/vitesse relative ($R/\dot{R}$) ainsi que les régions d'intérêts pour la commande, où, D_{maxH} et D_{max} représentent la décélération maximale que peut réaliser la commande et celle du véhicule leader respectivement, R_H et R_s sont respectivement le seuil de sécurité et le seuil critique de distance de sécurité pour une vitesse relative nulle.

Les avantages de l'ACC sont : i) la vitesse du véhicule souhaitée par le conducteur est respectée par le système, ii) la vitesse du véhicule est automatiquement adaptée à celle du véhicule qui le précède (suivi de véhicule), iii) le conducteur est déchargé du contrôle de la distance de sécurité. Il a été montré dans [64] qu'un tel système permet d'augmenter le flux de véhicules sur autoroute, et ainsi réduire les congestions.

En amont de l'ACC, des recherches sont menées pour améliorer le contrôle longitudinal des véhicules notamment pour l'évitement des collisions frontales en intégrant des modèles de distances (temps) de sécurité et/ou une procédure de freinage d'urgence [118] [43] [149] [86]). Dans [91], le contrôle longitudinal d'un véhicule avec évitement de collision et stop&go est étudié. Il s'agit d'un asservissement d'une inter-distance évaluée à partir d'un modèle non linéaire de cette dernière garantissant un niveau de confort acceptable en termes d'accélération et de jerk ainsi que la sécurité des passagers.

Il a été souligné dans [4] que dans certaines situations d'évitement de collisions, une commande longitudinale (freinage) seule peut être insuffisante et une action de braquage (latéral) doit être associée.

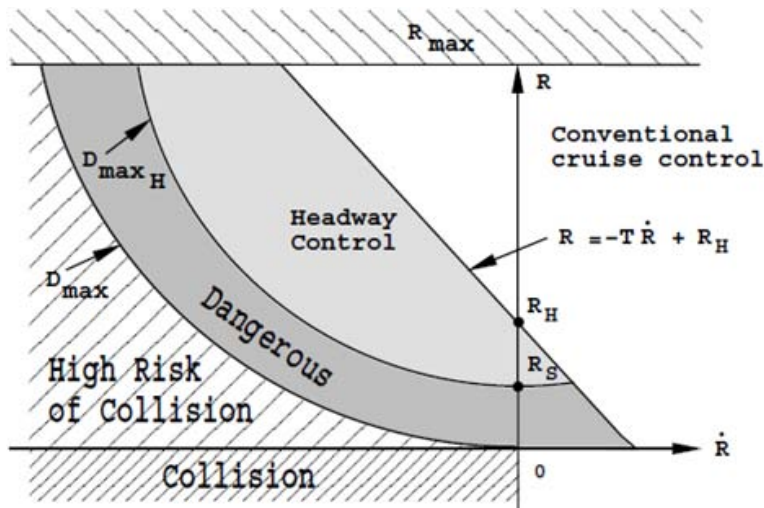


FIGURE 2.10 – Diagramme de phase interdistance / vitesse relative [118]

2.6.2 Assistance au contrôle latéral

Le contrôle latéral a toujours suscité un intérêt particulier dans le domaine de l'automobile. Ainsi depuis les années 70, l'idée d'un guidage autonome du véhicule a fait son apparition en Allemagne dans le cadre de projets visant à améliorer les transports en commun dans les grandes villes. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le système "0-Bahn" permettant un guidage autonome des bus sur des voies spécialement aménagées.

Vers les années 90, il s'est avéré évident que réaliser des véhicules autonomes n'était pas pour un futur proche. Les recherches se sont donc plus orientées vers une assistance au guidage du véhicule avec le conducteur maintenu présent dans la boucle, et le concept de copilote a fait son apparition dans le domaine automobile (démonstrateur Pro-Lab [38, 51]).

De nombreux travaux de recherche sont menés depuis pour la mise au point de tels systèmes, [103, 104, 110, 111, 113, 1].

Dans [41] puis [112] et [111] les auteurs proposent d'adapter la méthode du champ potentiel, développée dans un premier temps par Khatib [65] pour la commande de robots manipulateurs puis pour la robotique mobile, pour la conception d'un système d'assistance à la conduite. Le principe du champ potentiel est d'affecter une fonction de risque ou dangerosité pour chaque objet présent dans l'environnement du véhicule (détecté par le système de perception). La force virtuelle agissant sur le véhicule est calculée par dérivation de la somme des fonctions attribuées aux différents objets présents dans l'environnement : bordure de la voie, obstacles mobiles et fixes, ... (voir la figure 2.11). Cette force est convertie en couple de braquage appliqué sur un système de direction "steer-by-wire" permettant de guider le véhicule le long de la trajectoire obtenue par un calcul de minima du champ potentiel. Ces travaux ont été implémentés et testés sur un véhicule d'essai et les résultats obtenus sont assez prometteurs mais présentent des oscillations autour du centre de voie.

Dans [118] une commande assurant le contrôle longitudinal et latéral d'un véhicule est déve-

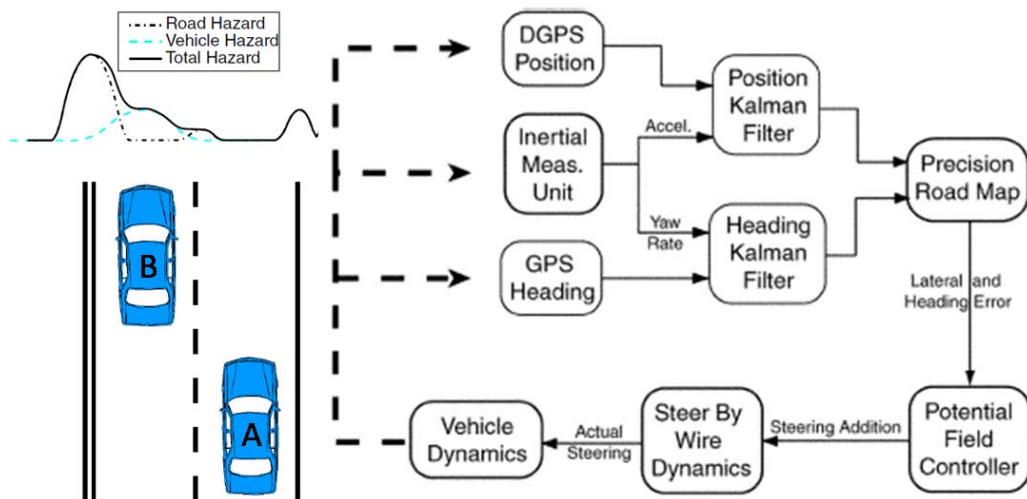


FIGURE 2.11 – Image du champ potentiel en 2D et la structure de commande proposée dans [112].

loppée. L'approche est basée sur un système élastique virtuel modélisant les distances séparant le véhicule des objets détectés dans son entourage. Deux contrôleurs sont implémentés, un premier chargé du maintien de l'inter-distance en longitudinal et le second de l'écart latéral du véhicule par rapport au centre de la voie. Cette approche ressemble au champ de potentiel.

Dans les travaux de [12], s'inscrivant dans la continuité des travaux de [96] sur le contrôle longitudinal et la gestion des interdistances, l'auteur a traité le problème du contrôle couplé longitudinal et latéral à basse vitesse pour le suivi de véhicule. Plusieurs correcteurs non linéaires basés sur les techniques des modes glissants, ainsi que sur les techniques de backstepping ont été développés et testés en simulation. La loi de commande pour le suivi de véhicule assure à la fois la gestion des interdistances et de l'erreur de positionnement latéral entre les deux véhicules (leader et suiveur). Dans [137], l'auteur a proposé un attelage virtuel pour le suivi de véhicule en utilisant un RADAR. Le contrôle flou type Takagi-Sugeno (TS) est utilisé pour la commande en longitudinal et en latéral. Une implémentation sur véhicule réel est réalisée. Le problème rencontré est que le véhicule coupe les virages pour réaliser la poursuite.

Dans la plupart des travaux présentés, le conducteur, que l'on veut assister, n'est sollicité qu'après la conception pour évaluer l'acceptabilité du système. Le constat fait, est que le conducteur (qui avait l'habitude de conduire un véhicule seul) considère cette assistance comme une intrusion qui peut biaiser ses sensations de la dynamique du véhicule. D'autre part, l'assistance, elle aussi, prend les actions du conducteur comme des perturbations et les rejette.

Le paragraphe suivant aborde ce débat en présentant la problématique de l'automatisation en général et de la conduite automobile en particulier.

2.7 Les problèmes liés à l'automatisation

Pourquoi et quand automatiser ? La question peut paraître incongrue, mais de nombreuses recherches posent cette question qui est d'autant plus cruciale dans les systèmes qualifiés de complexes.

Pour les humanistes, on automatise toutes les tâches pénibles, difficiles, monotones ou encore risquées pour un être humain afin de lui faciliter la vie, alors que l'approche économiste regarde le problème du point de vue rentabilité et recommande l'automatisation lorsqu'elle revient moins chère que l'homme. Pour l'approche, centrée technique, il faut automatiser à partir du moment où cela est faisable techniquement et les énormes progrès techniques de ces dernières décennies sembleraient réaliser le rêve des "humanistes", satisfaire les économistes et donner raison aux défenseurs des techniciens[25].

Dans un article célèbre intitulé les "*ironies de l'automatisation*" [6] l'auteur dénonce les effets néfastes de l'automatisation *d'une partie* des tâches humaines. Un autre article intitulé "*Charge of the Byte Brigade*" [19] montre que l'augmentation des automatismes permet d'améliorer les fonctionnalités des systèmes grâce à de nouvelles technologies, et ce de manière plus économique, mais que l'opérateur dans le système global est considéré à la fois comme une *source d'infirmité* et le *garant du fonctionnement correct* du système. Lorsqu'un système ne peut être complètement automatisé pour différentes raisons, l'opérateur, pour assurer les tâches qui lui sont affectées, doit donc, assimiler le fonctionnement du système dans sa nouvelle configuration.

L'automatisation ne doit donc pas consister à retirer purement et simplement une partie des tâches à l'homme au profit de la machine, sans au préalable vérifier que l'opérateur puisse continuer à maîtriser le procédé et les situations qu'il a à gérer [25].

C'est l'approche de l'automatique "humaine" qui cherche donc à maintenir "l'opérateur dans la boucle" (de contrôle/commande) [42]. De ce fait, automatiser consiste à concevoir un système qui accomplit partiellement ou totalement une fonction qui était ou pourrait être partiellement ou totalement réalisée par un opérateur humain [101]. Ce qui a pour effet d'augmenter de manière importante les interactions entre ces opérateurs et le système global, ce qui n'est pas sans poser d'autres problèmes.

Néanmoins, si l'on cherche à automatiser c'est bien parce que d'une part l'opérateur n'est pas toujours capable de réaliser toutes les tâches nécessaires à la gestion correcte d'un procédé à cause de sa complexité (par exemple, éviter le blocage des roues lors d'un freinage : la fonction ABS), et d'autre part parce que cet opérateur n'est pas toujours fiable (dans les accidents à un seul véhicule sans piéton la **responsabilité présumée du conducteur est avérée dans 95%** des cas ([73] P.13)).

Les évolutions technologiques, permettent actuellement d'automatiser en partie des tâches qui relevaient jusqu'à présent d'un niveau décisionnel tenu par les opérateurs de supervision. Les systèmes homme-machine se transforment de plus en plus en des systèmes dits cognitifs ou des systèmes cognitifs joints dans lesquels les interactions entre agents, humains et artificiels,

prennent une part importante [56], et où les opérateurs ont à assurer en plus la maîtrise des aides proposées. **Automatiser de tels systèmes, et la voiture ne fait pas exception, nécessite donc d'intégrer ces aspects dans une démarche centrée sur l'opérateur humain.**

D'après les auteurs de [44], une assistance conçue sans la prise en compte du conducteur est plus problématique que bénéfique pour le conducteur et les auteurs estiment que l'intervention d'une assistance pour améliorer le niveau sécuritaire et le confort de la conduite doit être suffisamment justifiée par rapport à l'autonomie du conducteur.

2.8 Coopération dans la conduite automobile

La coopération homme-machine est une problématique posée en automatique depuis l'introduction de systèmes automatisés dans les différents domaines de l'activité humaine, notamment dans le domaine de l'aviation [101] [53].

Dans la conduite automobile, cette problématique est relativement récente, son apparition suit les premiers travaux sur l'assistance à la conduite à la fin des années 80 (ASV³ au Japon, PATH⁴ aux USA, PROMETHEUS⁵ en Europe).

Ainsi, dès les années 90 des travaux ont commencé à aborder cette question dans les systèmes d'aide à la conduite [93]. A la différence du domaine de l'aviation, où les pilotes sont bien formés sur leurs appareils, l'automobile est destinée au grand public, formé d'individus de niveaux techniques variés. Une assistance à la conduite, donc, doit être conçue de telle sorte à répondre aux besoins de tous.

D'après Piaget : ” *Coopérer dans l'action, c'est opérer en commun, c'est-à-dire ajuster au moyen de nouvelles opérations, les opérations exécutées par chacun des partenaires, c'est coordonner les opérations de chaque partenaire en un seul système opératoire dont les actes mêmes de collaboration constituent les opérations intégrantes* ” [53].

Cela nous conduit aux questions suivantes :

- Quand intervenir pour assister le conducteur ?
- Comment le faire et à quel degré ?
- Quel effet aura cette intervention sur le conducteur ?
- En dernier, à qui attribuer la responsabilité de la conduite ?

Les auteurs de [54], dans le cadre du projet ARCOS⁶, subdivisent en quatre niveaux l'assistance qui peut être apportée à un conducteur [83] :

Perception : des compléments d'informations sur la conduite sont fournis au conducteur. Ces informations peuvent être issues directement des capteurs ou reconstruites à partir d'observateurs et affichées après traitement.

Contrôle mutuel : le traitement de l'information est plus élaboré, le diagnostic de la situation

3. Advanced Safety Vehicles

4. Partners for Advanced Transit and Highway

5. PROgramMme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety

6. ARCOS : Action de Recherche pour une COnduite Sécurisée

permet l'émission d'une alerte lors de l'occurrence d'un événement risqué. Ce niveau intègre quatre sous-niveaux de coopération

- Mode avertisseur : des alertes sont transmises au conducteur lorsqu'une situation critique de conduite est détectée ;
- Mode suggestif : des suggestions d'actions sont faites au conducteur pour minimiser un risque détecté ;
- Mode limite : les actions du conducteur sont limitées (une saturation) afin d'éviter la transition vers une zone à haut risque (durcir la pédale d'accélération à l'approche d'un véhicule à l'avant, au dépassement de la vitesse limite ...etc) ;
- Mode correctif : les actions du conducteur subissent un traitement préalable avant d'être transmises aux organes (e.g lors d'un freinage brusque l'ABS empêche les roues de se bloquer et régulant la pression de freinage)

Délégation : Certaines tâches de conduite sont complètement déléguées au système d'aide comme par exemple la régulation automatique de la vitesse du véhicule ;

Mode automatisé : Dans ce cas, le conducteur est complètement déchargé du processus de conduite (véhicule autonome).

Cette subdivision est revue dans [95] pour un cadre plus spécifique de la coopération dans le contrôle latéral du véhicule. Les auteurs revoient le mode **Contrôle mutuel** où ils gardent le **mode avertisseur** (critiquant les actions du conducteur) et remplacent les **modes limite et correctif** par un mode nommé "**co-action**". Dans ce dernier, le copilote électronique participe à la tâche de conduite en agissant sur la dynamique du véhicule avec une forte interaction avec le conducteur. De ce fait, l'activité du conducteur est fortement influencée par les actions du copilote électronique et il ne peut les ignorer.

Plus récemment, plusieurs projets collaboratifs ont traité de la problématique de l'automatisation de la conduite. Le projet européen HAVEit⁷ (février 2008-juillet 2011 doté de 28 M euro) regroupant 17 partenaires industriels et académiques. Il a avisé, à long terme, une automatisation des moyens de transport des personnes et de marchandises pour plus de sécurité, de confort et d'efficacité. Les degrés d'automatisation varient de l'absence d'assistances actives (simplement un système d'information) à un degré d'automatisation très élevé. Aucun niveau complètement automatique n'est développé, sauf sur des zones "sécurisées", pour des raisons de compatibilité juridique comme rapporté sur la figure 2.12.

Dans ce projet le niveau d'assistance au conducteur est ajusté d'une façon dynamique et est

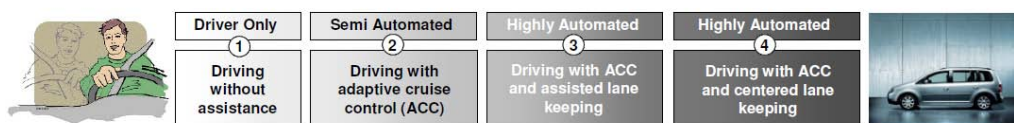


FIGURE 2.12 – Les niveaux d'assistance au conducteur dans HAVEit [20]

7. Highly Automated VEHicles for intelligent transport

fonction de l'état du conducteur. Comme rapporté sur la figure 2.13, le conducteur est en charge de la conduite avec un minimum d'assistance lors d'une situation de conduite où la charge de travail du conducteur est jugée normale et plus la charge de travail du conducteur augmente ou diminue, plus l'assistance qui lui est apportée devient forte.

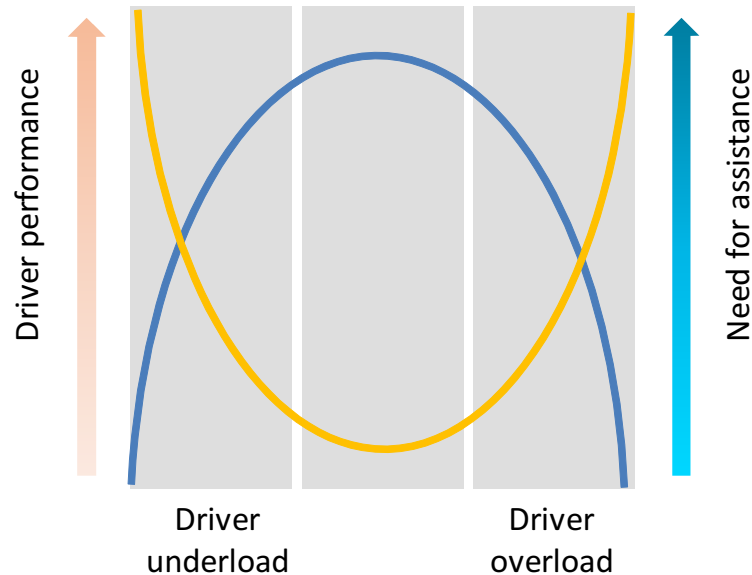


FIGURE 2.13 – La dynamique du niveau d'assistance au conducteur en fonction de l'état de conducteur vue par HAVEit [20]

Le projet PARTAGE⁸ (Juin 2009 à Mai 2012) avait comme objectif de contribuer à rendre les voitures plus sûres et plus ergonomiques, en intégrant les technologies de l'information et de la communication, en particulier les automates d'assistance à la conduite. Il se concentre sur la fonction de prévention des sorties involontaires de voie, en virage ou en ligne droite, grâce à des observateurs de défaillance de trajectoire pour la prévention et la détection de situations à risque ou de défaillances humaines, en agissant par anticipation des dispositifs de type ESP. Il traite de la coopération entre conducteurs et dispositifs techniques, dans une perspective de contrôle partagé (entre conducteur et automate) en considérant l'acceptabilité des automates, les styles de conduite (différences individuelles) et les distractions. Ce projet se propose d'intégrer les fonctions de contrôle latéral et longitudinal de la trajectoire, en intégrant notamment :

- le réglage de la vitesse d'approche d'un virage ;
- la prévention des sorties de voie ;
- la partage du contrôle entre conducteur et automate en longitudinal et latéral ;
- la sécurisation et le confort de trajectoire le plus possible en anticipation des limites de la dynamique du véhicule.

8. Contrôle partagé entre conducteur et assistance à la conduite automobile pour une trajectoire sécurisée

2.8.1 Coopération au niveau de l'action

Dans cette partie, nous exposerons quelques travaux réalisés intégrant le partage et la coopération au niveau de l'action entre le conducteur et l'assistance (commande-actionneur).

L'introduction d'un système automatique agissant en parallèle avec le conducteur, génère une situation nouvelle pour le conducteur, qui a l'habitude de conduire son véhicule seul.

Les auteurs de [44] proposent une solution dans laquelle l'autonomie du conducteur est privilégiée par une évaluation à priori des conséquences engendrées par l'intervention de l'assistance et proposent une architecture de coopération représentée dans la figure 2.14. Les auteurs font appel à la théorie de la décision, les différentes variables mises en jeu dans l'état de conduite sont : l'état de l'environnement, celui du véhicule et celui du conducteur. Les auteurs se limitent à l'estimation du TLC (Time to Line Crossing) pour évaluer l'état de la conduite. Ce paramètre estimé sera utilisé pour évaluer le niveau de risque de la situation de conduite (sortie de voie) ainsi qu'une autre fonction renseignant le degré d'intrusion de l'assistance. En prenant en compte le temps de réaction du conducteur, une base de règles décisionnelles probabilistes des actions de l'assistance est formulée. Selon la situation de conduite : le système alerte le conducteur puis entame une action corrective dans le cas où le conducteur ne corrige pas sa trajectoire.

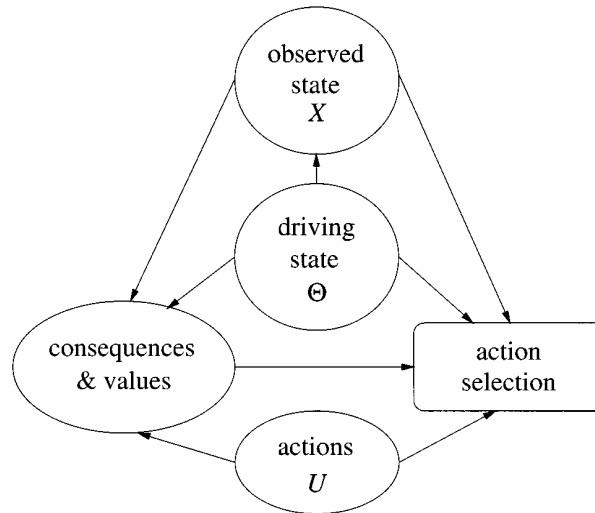


FIGURE 2.14 – Architecture globale d'une coopération dans la conduite [44]

Effectivement, le TLC représente un bon indicateur de risque de sortie de voie, mais il n'est pas directement exploité par les conducteurs comme variable de contrôle. Dans le cadre du projet PREVENSOR, une étude a montré la difficulté de trouver un seuil de sécurité temporel utilisé par les conducteurs pour corriger leur trajectoire. L'étude ne recommande pas l'utilisation du TLC pour le déclenchement des assistances à la conduite.

De même, dans le cadre de sa thèse, Enache [34] a proposé une assistance pour éviter les sorties de voie en proposant comme solution, au problème du partage de conduite, un système hybride ouvert où la direction du véhicule est soit assurée par le conducteur soit par un (copilote élec-

tronique) e-copilote. L'apport de ce travail est que la stabilité du système est garantie lors des transitions entre les deux états du système. Le théorème de stabilité de Lyapunov et les outils d'optimisation LMI (Linear Matrix Inequalities) et BMI (Bilinear Matrix Inequalities) sont utilisés pour la synthèse de lois de commande garantissant la stabilité du système global.

Le problème ainsi traité, remet en cause le conducteur et donne plutôt plus d'autorité au e-

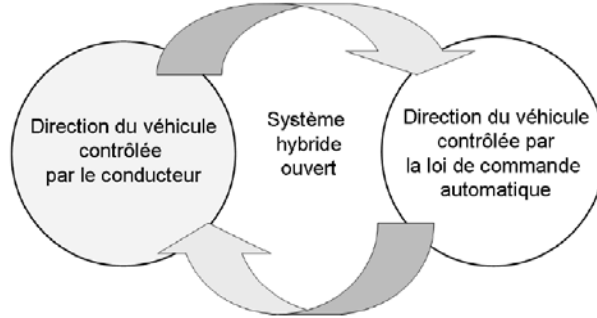


FIGURE 2.15 – Conduite partagée comme système hybride (switch) [34]

copilote.

Contrairement à cette démarche, dans [11] les auteurs accordent plus d'autorité au conducteur puisqu'ils concèdent que le système de perception humaine surpasse les systèmes de vision artificielle. Dans leur approche, rapportée sur la figure 2.16, en parallèle au contrôleur assurant le maintien de voie (C_1 : signal de commande l'angle de braquage θ'), un second contrôleur ($C_2 = C_d G_a G_p$) réalise la fonction inverse qui s'active et annule l'action du premier contrôleur dès que le conducteur applique un couple de braquage (τ) sur le système de direction (G_d). De cette façon le système fonctionne en permanence et aucun besoin de le désactiver n'est nécessaire.

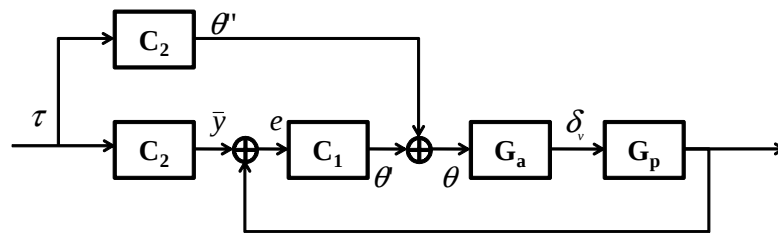


FIGURE 2.16 – Architecture de partage du contrôle latéral proposée dans [11]

Les approches exposées jusque-là, conçoivent le problème de partage en tout ou rien, c'est à dire que le contrôle est soit assuré par le conducteur seul ou le e-copilote seul. Une des pistes explorées dans la recherche, pour un partage continu du contrôle, est l'exploitation des flux d'informations échangés entre un conducteur et un e-copilote via le système de direction (**l'interface haptique**) où le conducteur ressent les actions du e-copilote. Dans [45] puis dans [46], les auteurs ont utilisé un volant motorisé pour constituer une interface haptique via laquelle un conducteur et un e-copilote partagent le guidage du véhicule dans un environnement contenant des obstacles

non détectés par le e-copilote. Un des résultats de cette étude est que, lorsque le conducteur conduit avec le e-copilote, sa charge de travail diminue fortement : la sollicitation visuelle du conducteur est réduite de 29% avec un gain en performances de maintien de voie d'au moins 30%. En effet, puisque le e-copilote assure le maintien de voie, le conducteur n'est pas obligé de regarder la route tout le temps pour garder le véhicule sur la route : le conducteur devient superviseur, et peut consacrer le reste du temps à faire une autre tâche. Par contre, le nombre d'obstacles percutés est supérieur lors de la conduite partagée, puisque le conducteur met trop de confiance dans le e-copilote (en simulation).

Dans un récent article intitulé "Haptic shared control : smoothly shifting control authority ?" [3] les auteurs établissent un état de l'art sur le partage du contrôle haptique et mettent en avant l'avantage que présente ce type de contrôle partagé. Les auteurs mettent en évidence que dans ce type de contrôle l'humain est en échange permanent avec l'automate via la force qu'exerce chacun des deux protagonistes pour accomplir la tâche en question. Cet échange peut être utilisé pour modifier le niveau d'autorité de l'automate en agissant sur l'amplitude "maximale" de la force qu'il délivre ou ce qu'ils appellent "le niveau d'autorité haptique : The level of haptic authority (LoHA)". Pour accorder plus d'autorité à l'automate il suffit d'augmenter l'amplitude de la force avec laquelle il intervient.

Les auteurs ont proposé dans [2] un schéma global d'un contrôle partagé de la conduite basé sur les connaissances neuromusculaires (figure 2.17). Dans un premier temps, ils mettent avant la nécessité d'inclure à la dynamique du système de direction, la dynamique des membres supérieurs du conducteur. Le conducteur, en fonction de ce qu'il souhaite faire (ref_{human}), génère une force de commande ($F_{command}$) pour réaliser son objectif. Cette force est adaptée pour garder la position souhaitée (angle volant). Ce fait peut être interprété comme une adaptation de l'impédance de son système neuromusculaire (H_{nms}). De la même manière, le e-copilote peut générer sa force de commande, mais pas uniquement, lui aussi peut adapter l'impédance de l'interface de commande (H_{ci}) si le conducteur veut s'écarter de l'angle volant désiré par le système (sur la figure le K(crit) modélise la raideur d'un ressort qui est en fonction de la criticité de situation). Les auteurs préconisent que l'automate doit avoir une représentation interne de l'interaction physique (H_{pi}) comme l'opérateur humain. Dans une expérimentation de changement de voie initié par le e-copilote, il a été mis en évidence que le conducteur humain peut adapter l'impédance qu'il impose au système via les muscles du bras, et le fait de changer dynamiquement l'impédance de l'interface de commande est un moyen intéressant de passer en "douceur" l'autorité du contrôle. Par contre dans cette étude, les auteurs cherchent une solution pour plutôt donner plus d'autorité au contrôleur en augmentant son impédance (via K(crit)) pour pouvoir imposer la trajectoire de référence du e-copilote.

Les auteurs de [15] proposent d'utiliser un modèle conducteur pour la synthèse d'une loi de commande robuste à un modèle de référence. Afin de gérer les problèmes de conflits, un algorithme décisionnel permettant de pondérer les actions du conducteur et celles de l'automate est utilisé (voir la figure 2.18). La pondération des actions est faite en multipliant l'action du

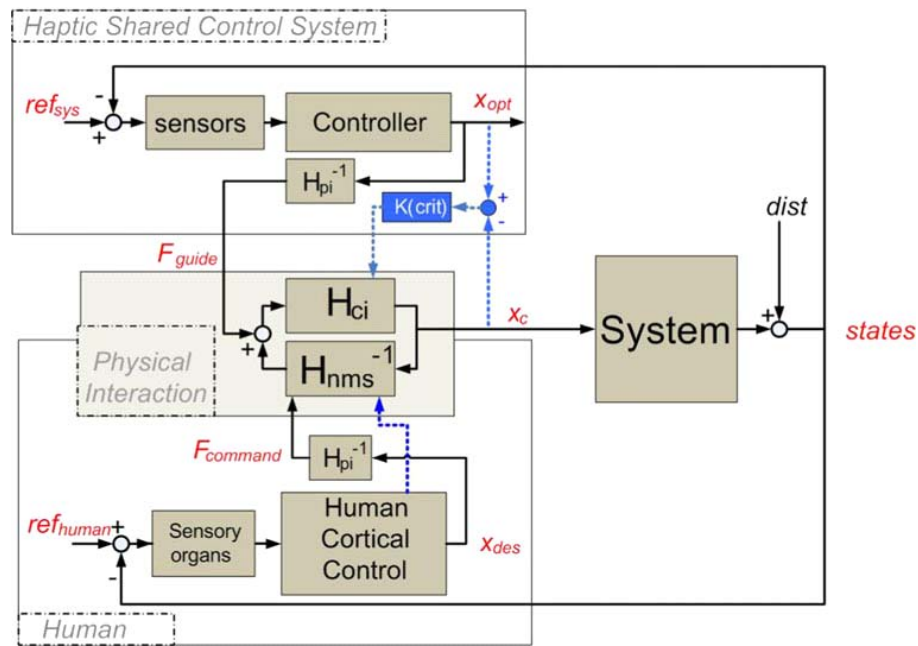


FIGURE 2.17 – Schématisation d'un contrôle partagé haptique [2]

contrôleur par un facteur β et celle du conducteur par $(1 - \beta)$. Les auteurs proposent de calculer la pondération selon l'état du conducteur, par exemple : on donne 100% du contrôle au e-copilote uniquement si on est sûr que le conducteur est fatigué ou distrait. Les auteurs utilisent l'angle

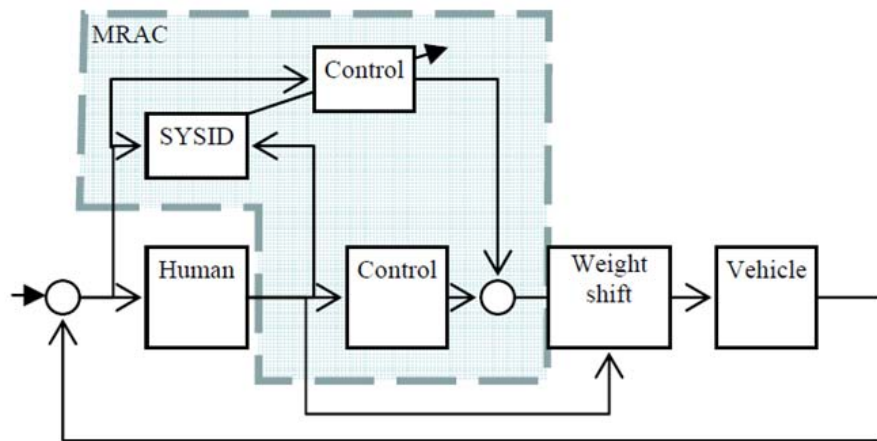


FIGURE 2.18 – Coopération par pondération des actions [15]

de braquage comme signal de commande, ce qui n'est pas vraiment approprié pour une conduite partagée [92] [124].

Récemment, dans sa thèse de doctorat, Saleh L. [79] a abordé la problématique de partage de conduite entre le conducteur humain et un e-copilote. Deux contrôleurs (commande H_2 /LQ anticipative) ont été conçus. Le premier est un contrôleur de maintien de voie obtenu en consi-

dérant un modèle véhicule-route. La problématique de partage est traitée de la même manière que proposée dans [15], i.e, le signal de commande (couple de braquage) est partiellement appliqué sur le système de direction, ce qui oblige le conducteur à compléter le reste du couple nécessaire au guidage du véhicule. Le deuxième contrôleur, comporte un modèle conducteur qui est rajouté au modèle véhicule-route lors de la synthèse, ce qui permet de mieux formaliser le concept de partage (coopération) dans la conduite. L'auteur traite la problématique de partage de conduite pour des scénarios de maintien de voie sans présence d'obstacle ou des changements de voies.

Durant la conduite le conducteur ne conduit jamais sur une seule voie. Des changements de voie sont souvent nécessaires soit parce qu'il y a un obstacle à éviter, soit pour doubler un autre véhicule ...etc. Pour ce faire une coopération à un niveau hiérarchique plus élevé est indispensable (§ 2.2.1).

2.8.2 Coopération au niveau du guidage

Dans la section précédente, quelques approches adoptées pour améliorer la coopération ou le partage du contrôle latéral d'un véhicule avec son conducteur, au plus bas niveau du contrôle (action), ont été exposées. Dans cette partie nous allons évoquer quelques réalisations traitant de la coopération entre assistance et conducteur au niveau du guidage .

Pour des raisons d'acceptabilité du système par le conducteur, d'autres travaux proposent d'utiliser un modèle conducteur dans la génération de trajectoires pour la conception de l'assistance afin de rapprocher le comportement de l'assistance de celui du conducteur [72]. Dans [9] et [8] les auteurs proposent une architecture de coopération entre une assistance au maintien de voie et le conducteur où l'intention du conducteur est prise en compte au niveau planification afin de gérer les problèmes de conflits qui peuvent être rencontrés au niveau action (braquage). Dans l'architecture proposée (voir la figure 2.19), le contrôle latéral du véhicule est partagé entre le conducteur et un e-copilote . Celle-ci est basée sur la planification de trajectoire en utilisant la méthode du champ de potentiel. Le module de planification de trajectoire adapte la trajectoire future en fonction des intentions du conducteur en prenant en compte l'angle de braquage actuel "imposé par le conducteur " afin de minimiser l'interférence négative du système avec le conducteur. La coopération est exprimée via l'interface haptique au volant où le conducteur perçoit les intentions de l'assistance. Cependant, le conducteur doit vaincre le couple du e-copilote pour imposer un angle de braquage au volant.

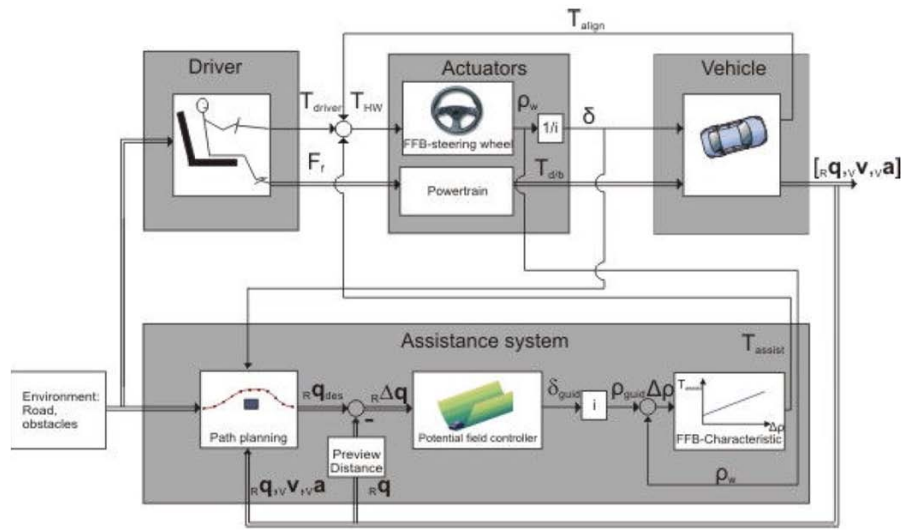


FIGURE 2.19 – Architecture de coopération conducteur/assistance [8]

2.9 Réalisations industrielles

En 2004, Honda a déjà proposé un système d'assistance à la conduite nommé : Honda intelligent Driver Support System (HiDS) sur son modèle Accord (commercialisée au Japon). Cette assistance combine une assistance au maintien de voie LKAS (Lane Keeping Assistance System) et un régulateur de vitesse de type (ACC). Le système HiDS est opérationnel dans la plage de vitesses de 65 à 100 Km/h et pour des courbures de virage de rayon minimal de 230m. L'objectif est de réduire la charge du conducteur via un couple d'assistance sur la colonne de direction complémentaire à celui du conducteur. Le système fournit jusqu'à 80% du couple nécessaire au braquage. Le concept de fonctionnement de cette assistance est décrit dans la figure 2.20.

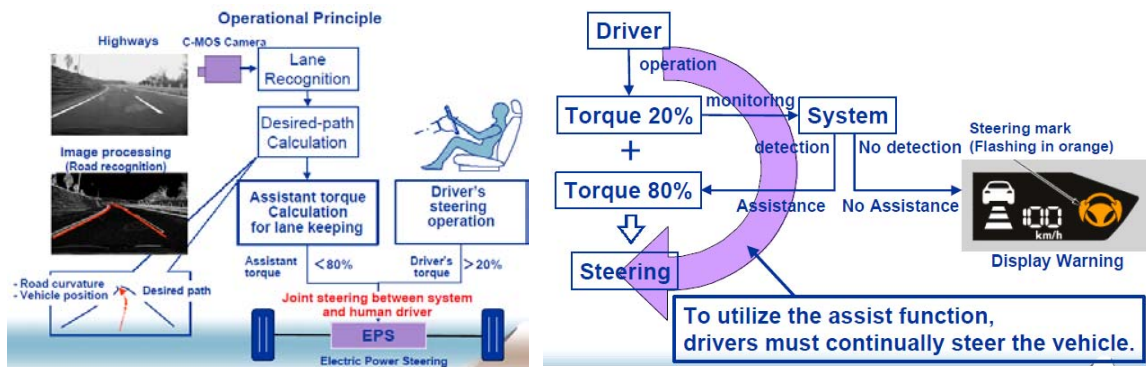


FIGURE 2.20 – Principe de fonctionnement de HiDS

Dans [26] les auteurs exposent le système en développement chez Ford (figure 2.21). Ce système dans un premier temps avertit le conducteur par une alerte haptique (vibrations au volant) lorsque le véhicule commence à dériver. Si le conducteur ne réagit pas, après un certain temps, un "faible" couple de braquage est appliqué sur le système de direction. Dans le cas où

le conducteur n'intervient pas, le véhicule est ramené sur la voie par l'automate. Le système est désactivable par l'activation des clignotants comme c'était le cas pour AFIL.

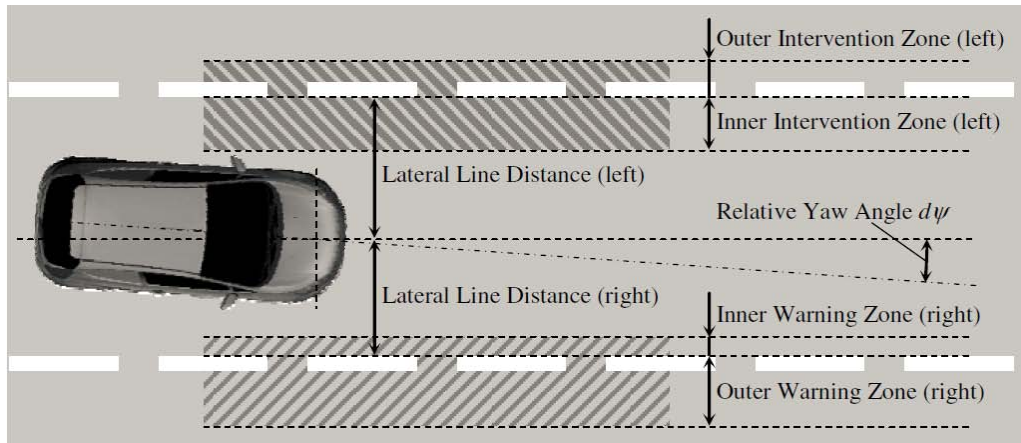


FIGURE 2.21 – Architecture du système d'aide proposé par Ford [26]

En séance plénière d'ouverture à la conférence IEEE Vehicular Technology à Las Vegas, le 3 Septembre 2013 a été présentée la démonstration du véhicule autonome réalisée le 12 Juillet 2013 à Parme (Italie) par le laboratoire VisLab (The Artificial Vision and Intelligent Systems Laboratory) de l'université de Parme où l'on peut voir le véhicule parcourir une route de campagne, puis une autoroute pour ensuite rentrer dans le centre ville de Parme en toute autonomie (sous la supervision d'un conducteur) (<http://vislab.it/news/new-autonomous-driving-test-proud2013/>). Et bien sûr, on ne peut, aujourd'hui, parler de véhicule autonome sans évoquer la Google Driverless Car qui sillonne les rues de la Californie depuis 2010 [85].

D'après ce que nous avons vu jusqu'ici, Le problème majeur dans le contrôle partagé est la gestion de conflits quand les deux intervenants -le conducteur et le e-copilote- n'ont pas le même objectif. Par exemple, dans une situation de négociation de virage, l'objectif de la commande peut être de réduire l'écart latéral par rapport au centre de la voie (l'aspect sécurité) pendant que le conducteur peut avoir comme objectif d'optimiser la trajectoire pour avoir un gain de temps avec plus de confort ou bien dans une situation où le e-copilote ne détecte pas un danger sur la route que le conducteur veut éviter. Une des piste qui nous paraît plausible est d'exploiter l'approche du **contrôle partagé haptique**, qui, comme démontrait, permet une plus grande réactivité des deux intervenant.

2.10 Notre conception d'une coopération dans la conduite

La métaphore du cheval (H-Metaphor) introduite par Flemisch et al. [37] (figure 2.22), fournit un bon cadre de réflexion pour le contrôle partagé d'un véhicule entre un conducteur et un système avancé d'aide à la conduite (ADAS). La H-Metaphor reprend l'image de l'interaction entre un cavalier et son cheval comme source d'inspiration pour imaginer l'interaction entre le conducteur et le véhicule équipé d'un ADAS. L'idée principale est d'avoir un partage continu de

la tâche de conduite entre le conducteur et le véhicule. La métaphore se réfère aux extrêmes de l'interaction comme la bride sur le cou et la bride serrée.

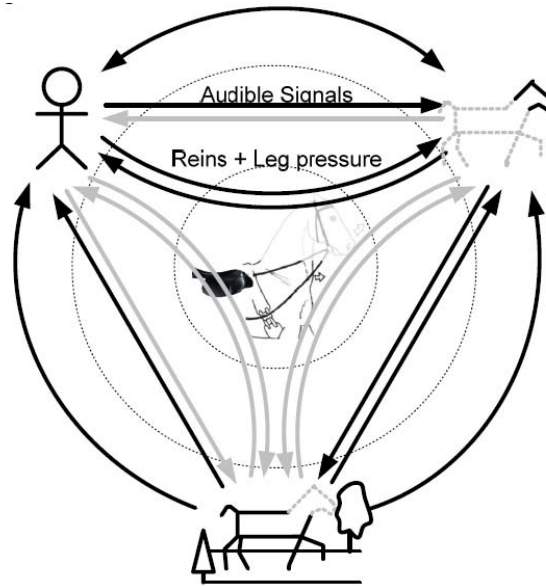


FIGURE 2.22 – Les différents interactions entre le cavalier et son cheval [36]

La bride sur le cou (**main hors le volant**) caractérise un mode où le cavalier (**conducteur**) pourrait être distrait, c'est donc au cheval (**véhicule**) de se déplacer en toute sécurité sur la route et de ne pas entrer en collision avec les obstacles présents dans l'environnement. Lorsque le cavalier (**conducteur**) indique, par bride serrée (**applique un couple sur le volant**), qu'il est conscient de la situation, il peut forcer le cheval (**le véhicule**) à engager des actions qu'il ne saurait pas faire ou n'aurait pas exécuté de sa propre initiative. Pour ce dernier scénario, on considère le cas où le conducteur veut réaliser une manœuvre que le système n'a pas envisagé ; éviter un obstacle non détecté par le système de vision du véhicule ou parce que le planificateur de trajectoire n'a pas assez de temps pour replanifier une trajectoire évitant l'obstacle.

Ainsi, à l'image de cette métaphore, notre but sera de concevoir une assistance à la conduite partageant la tâche de conduite avec le conducteur d'une manière continue. Comme le cavalier sur sa monture, le conducteur doit avoir la possibilité de laisser à l'assistance le contrôle total du véhicule s'il le souhaite, mais également celle d'imposer son style de conduite sans pour autant que l'assistance le contre. L'intervention du conducteur doit se faire de façon naturelle sous forme d'une coopération avec le système, sans nécessiter de changement de mode de fonctionnement.

La figure 2.23 donne un aperçu de notre conception de la coopération entre un conducteur et un ADAS, où deux niveaux de coopération sont mis en évidence.

Les deux niveaux de coopérations identifiés sont nommés, respectivement, Bas Niveau de Coopération **BNC** et Haut Niveau de Coopération **HNC**. Le premier, le BNC, se réalise au niveau des actions du conducteur et de l'ADAS via le système de direction du véhicule (volant) ; qui **constitue une interface haptique**. A ce niveau, le conducteur ressent directement à partir de

Chapitre 3

Modélisation du véhicule et environnement SHERPA

Sommaire

3.1	Introduction	33
3.2	Mouvements du véhicule	34
3.3	Forces et moments extérieurs agissant sur le véhicule	37
3.3.1	Origine des forces longitudinales et latérale	38
3.3.1.1	Angle de dérive d'un pneumatique	39
3.3.1.2	Taux de glissement	40
3.3.2	Modèle d'efforts de Coulomb/Burckhardt	40
3.3.3	Modèle de Pacejka	41
3.4	Expressions du modèle de véhicule simplifié	42
3.4.1	Positionnement latéral du véhicule sur la route	43
3.4.2	Système de direction avec assistance électrique	44
3.4.3	Modèle bicyclette du véhicule sur la route	46
3.5	Modèle conducteur pour le suivi de voie	47
3.6	Présentation de l'environnement de travail SHERPA	49
3.6.1	Outils pour la mise au point des "scénarios"	52
3.6.2	Outils pour l'analyse du comportement des conducteurs	53
3.6.3	Circuit de test de conduite	53
3.7	Validation du modèle véhicule adopté sur SHERPA-LAMIH	54
3.8	Conclusion	56

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'exposition de la modélisation du véhicule en vue de l'élaboration de lois de commande pour l'assistance au contrôle latéral du véhicule ainsi que d'observateur

pour la reconstruction d'état du système. Afin de réaliser cet objectif, des hypothèses, non restrictives pour notre cas d'application, sont posées pour permettre une simplification du modèle réel du véhicule.

Le véhicule est un système mécanique très complexe, un résultat des interactions de plusieurs modes non-linéaires (les roues, la suspension, la caisse,...), mais aussi de la variation des paramètres en fonction des conditions de fonctionnement (plusieurs paramètres varient avec la variation de la température par exemple). Cela fait que la modélisation du véhicule est souvent faite pour l'étude d'un comportement bien précis.

La littérature offre aujourd'hui plusieurs modèles exploitables pour divers applications : [96][12] [34] [123] [105]. Dans notre cas, on s'intéresse à l'assistance au contrôle latéral en situations normales de conduite où le comportement peut être modélisé en utilisant un modèle bicyclette à 3 DDL¹ [107].

Dans un premier temps, nous exposons les mouvements du véhicule dans les différents repères (§3.2), puis les forces agissant sur le véhicule sont recensées, notamment les forces de contact des pneumatiques avec la chaussée (§3.3). Par la suite, en appliquant les lois fondamentales de la dynamique, un premier modèle simplifié du véhicule est obtenu. Ce modèle sera augmenté par les équations dynamiques régissant les erreurs de positionnement du véhicule sur sa voie de circulation (§3.4.1). Comme on s'intéresse aux interactions du conducteur avec un système d'aide au maintien de voie, le système de direction du véhicule est modélisé pour faire apparaître les couples appliqués par chacun des intervenants et pouvoir quantifier la qualité du partage du contrôle du véhicule (§3.4.2). Pour avoir la possibilité d'étudier ces interactions en simulation numérique, un modèle conducteur de suivi de voie est introduit en section 3.5.

L'environnement de travail pour la validation des stratégies d'assistance à la conduite qui est le simulateur dynamique interactif SHERPA-LAMIH sera présenté en section 3.6. Le chapitre se termine par une validation du modèle développé avec des données recueillies sur le simulateur SHERPA-LAMIH.

3.2 Mouvements du véhicule

Le véhicule considéré comme un corps rigide présente six degrés de liberté : trois mouvements de translation et trois mouvements de rotation rapportés sur la figure 3.1.

Les mouvements de translation s'effectuent selon trois axes : OX, OY et OZ qui représentent, respectivement, l'axe longitudinal (parallèle à l'axe de symétrie de la caisse), l'axe transversal (perpendiculaire à l'axe longitudinal) et l'axe orthogonal aux deux axes précédents.

Les mouvements de rotation s'effectuent autour de ces axes et sont : le roulis qui est la rotation autour de l'axe longitudinal OX, symbolisé par ϕ ; le tangage qui est la rotation autour de l'axe transversal OY symbolisé par θ et le lacet qui est la rotation autour de l'axe vertical OZ noté ψ .

1. Degrés De Liberté

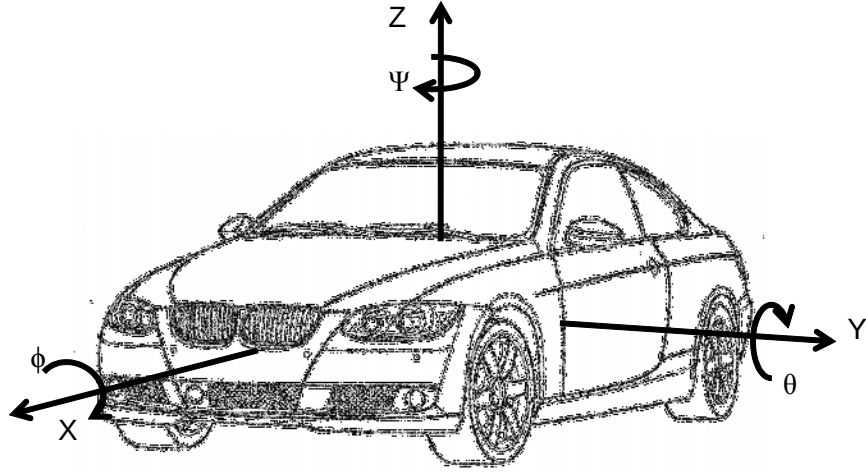


FIGURE 3.1 – Degrés de liberté des mouvements du véhicule.

Pour pouvoir modéliser le véhicule, il est nécessaire de définir les repères qui permettent une description complète et précise de ses mouvements. Le premier repère, $R^a(O^a, X_a, Y_a, Z_a)$ est le repère de référence galiléen, par rapport auquel on appliquera le principe fondamental de la dynamique et un deuxième repère, lié au véhicule, est noté $R^v(O^v, x_v, y_v, z_v)$ où son origine correspond à la projection du centre de gravité du véhicule (CG) sur le sol (voir figure 3.2).

Le passage du repère absolu R^a vers le repère véhicule R^v se fait par une translation de $O^a O^v$ selon l'axe $O^v x_v$ et une rotation d'un angle ψ autour de l'axe $O^a Z_a$ (sortant du plan (X_a, Y_a)). Les coordonnées dans le repère véhicule d'un point P, de coordonnées (x_a^p, y_a^p, z_a^p) dans le repère absolu s'obtiennent par :

$$\begin{pmatrix} x_v^p \\ y_v^p \\ z_v^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_a^p \cos(\psi) + y_a^p \sin(\psi) \\ -x_a^p \sin(\psi) + y_a^p \cos(\psi) \\ z_a^p \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{P_v^a} \begin{pmatrix} x_a^p \\ y_a^p \\ z_a^p \end{pmatrix}$$

On nome la matrice P_v^a par la matrice de passage du repère absolu au repère véhicule.

En appliquant le premier principe de la mécanique newtonienne on obtient :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \vec{\Gamma}_a^v \quad (3.1)$$

Où $\sum \vec{F}_{ext}$ est la somme des forces extérieures, $\vec{\Gamma}_a^v$ est le vecteur d'accélération absolue du véhicule exprimé dans le repère véhicule et m sa masse.

Pour des raisons de simplification, nous ne retiendrons dans la suite que trois degrés de liberté dans le mouvement du véhicule sous les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 La route est considérée plane et uniforme (sans dévers ni pente).

Hypothèse 2 Le mouvement de translation se réduit à deux degrés de liberté : le mouvement vertical est négligé et on ne considère que les translations longitudinale et latérale.

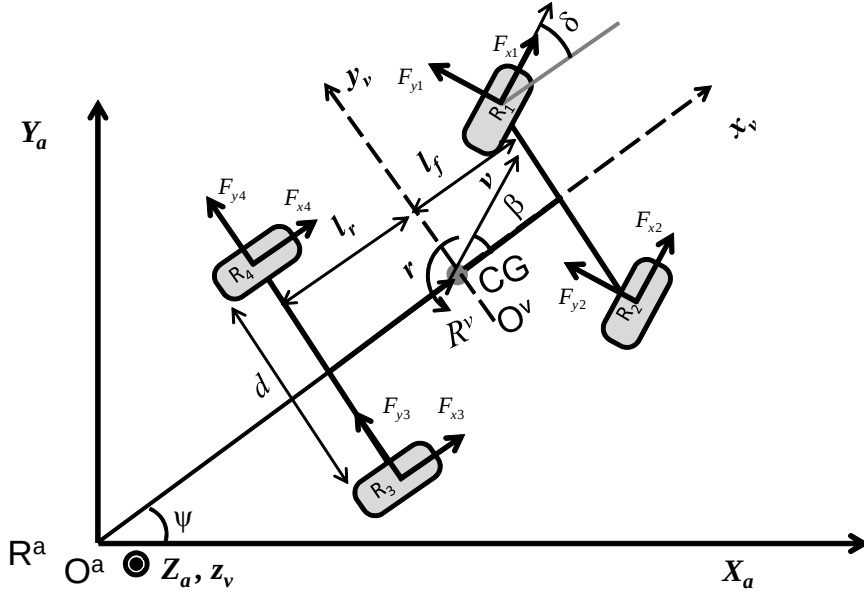


FIGURE 3.2 – Les différents repères pour la dynamique du véhicule.

Hypothèse 3 Les mouvements de roulis et de tangage sont négligés et le mouvement de rotation se résume au mouvement de lacet.

De ces hypothèses, on considère que :

- La vitesse relative du véhicule $\vec{V}_r = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$
- et sa vitesse de rotation relative $\vec{\omega}_a = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}$

Accélération absolue du centre de gravité du véhicule L'accélération absolue du centre de gravité du véhicule exprimée dans le repère véhicule et donnée par :

$$\begin{aligned}
 \vec{\Gamma}_a^v &= \vec{\Gamma}_r^v + \vec{\omega}_a \times \vec{V}_r \\
 &= \frac{d}{dt} \vec{V}_r + \vec{\omega}_a \times \vec{V}_r \\
 &= \begin{pmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\dot{\psi}v_y \\ \dot{\psi}v_x \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Où $(\times)$ désigne le produit vectoriel.

$$\Rightarrow \vec{\Gamma}_a^v = \begin{pmatrix} \dot{v}_x - \dot{\psi}v_y \\ \dot{v}_y + \dot{\psi}v_x \\ 0 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

En remplaçant dans l'équation de (3.1) on obtient :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \begin{pmatrix} \dot{v}_x - \dot{\psi}v_y \\ \dot{v}_y + \dot{\psi}v_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Puisqu'on néglige les mouvements verticaux du véhicule (le mouvement de roulis et de tangage), le véhicule est considéré comme étant un corps solide (les mouvements de suspension ainsi que la hauteur du centre de gravité sont négligés), le deuxième principe de la mécanique newtonienne peut s'écrire :

$$\sum \vec{M}_z = I \frac{d}{dt} \vec{\Omega} \quad (3.5)$$

$$\sum \vec{M}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \ddot{\psi} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

La dynamique de véhicule pour les mouvements considérés peut s'écrire alors :

$$\Rightarrow \begin{cases} \sum F_x = m(\dot{v}_x - v_y r) \\ \sum F_y = m(\dot{v}_y + v_x r) \\ \sum \mathcal{M} = I_z \dot{r} \end{cases} \quad (3.7)$$

Où δ est l'angle de braquage des roues avant et $r = \dot{\psi}$ est la vitesse de lacet du véhicule.

Dans la suite, les efforts agissant sur le véhicule sont formalisés.

3.3 Forces et moments extérieurs agissant sur le véhicule

Comme évoqué dans (2.4), le véhicule interagit avec l'environnement extérieur -la route- principalement via ses pneumatiques. La modélisation des forces de contact des roues n'est pas simple, puisqu'elle dépend de plusieurs facteurs liés principalement : aux caractéristiques physiques du pneumatique et de la chaussée ainsi que de son état (sèche, mouillée, verglacée...), de la charge verticale appliquée sur le pneumatique, de sa dynamique et surtout des **angles de dérive** des roues [107]. Comme rapporté sur la figure 3.2, sur chaque pneumatique, la force exercée sur ce dernier peut être décomposée en force longitudinale notée (F_{xi}) et latérale (F_{yi}) $i=1..4$ (roue 1.gauche avant, 2. droite avant 3. arrière droite 4. arrière gauche).

En reprenant l'équation (3.7) [82] :

$$\Rightarrow \begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y r) = (F_{x1} + F_{x2}) \cos(\delta) - (F_{y1} + F_{y2}) \sin(\delta) + F_{x3} + F_{x4} \\ m(\dot{v}_y + v_x r) = (F_{x1} + F_{x1}) \sin(\delta) + (F_{y1} + F_{y1}) \cos(\delta) + F_{y3} + F_{y4} \\ I_z \dot{r} = l_f((F_{x1} + F_{x2}) \sin(\delta) + (F_{y1} + F_{y1}) \cos(\delta)) - l_r(F_{y3} + F_{y4}) \\ \quad + \frac{d}{2}(F_{x3} - F_{x4} + (F_{x2} - F_{x1}) \cos(\delta) + (F_{y1} - F_{y2}) \sin(\delta)) \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec l_f , l_r sont, respectivement, les distances de l'essieu avant et arrière au centre de gravité du véhicule et d la largeur de chaque essieu. v_x , v_y , et r sont, respectivement, la vitesse longitudinale, la vitesse latérale du véhicule.

3.3.1 Origine des forces longitudinales et latérale

Les forces agissant sur le véhicule au niveau du contact pneumatique/chaussée (force d'interaction roue/sol) se décomposent en forces longitudinale et latérale. L'évolution de ces forces montre l'existence de trois zones différentes. La figure 3.3 représente l'allure de la caractéristique de la force latérale d'un pneumatique F_y en fonction de son angle de dérive (α_i) ainsi que sa force longitudinale (F_x) en fonction de sa dérive longitudinale (λ_i). Trois plages de fonctionnement

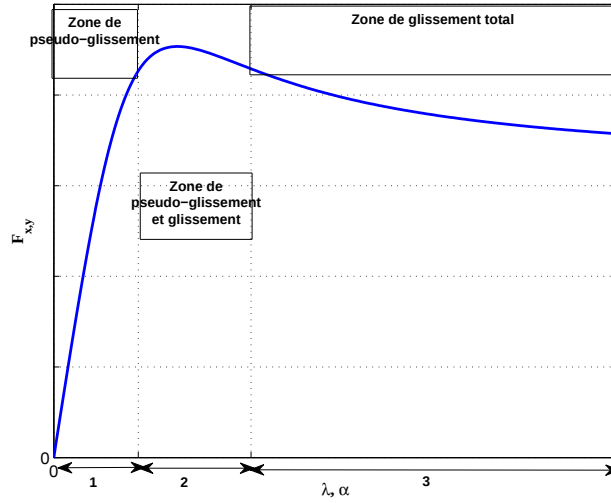


FIGURE 3.3 – Allure de la force longitudinale/latérale d'un pneumatique en fonction de son angle de dérive.

sont distinguées :

1. **Plage de pseudo-glisserment linéaire** : dans cette zone, les forces du pneumatique varient linéairement en fonction des glissements et peuvent être approximées par :

$$\begin{cases} F_{xi} &= K_i \lambda_i \\ F_{yi} &= C_i \alpha_i \end{cases} \quad (3.9)$$

Où K_i et C_i sont les coefficients de raideur longitudinale et latérale d'un pneumatique i . Cette correspond à une faible mobilisation de l'adhérence (conduite normale).

2. **Plage de pseudo-glisserment et glissement** : les forces dans cette zone sont non-linéaires et seaturent pour des sollicitations à la limite de l'adhérence dans laquelle le véhicule reste toujours contrôlable ;
3. **Plage de glissement total** dans cette zone, les forces sont saturées suite à une forte mobilisation de l'adhérence et le véhicule devient difficilement contrôlable .

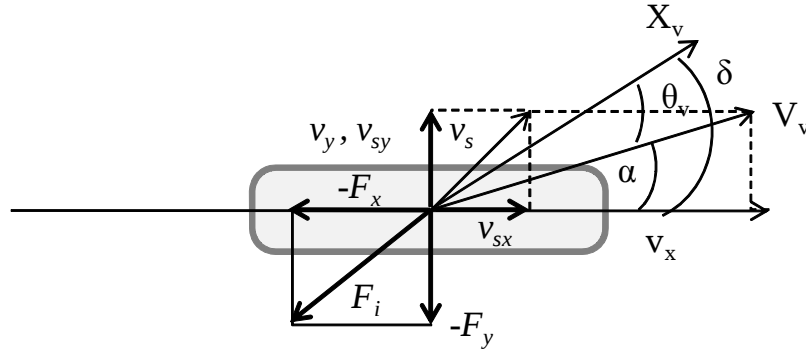


FIGURE 3.4 – Angle de dérive d'un pneumatique et les forces longitudinale et latérale résultantes [126].

Comme nous nous intéressons à un système d'assistance au contrôle de la dynamique latérale du véhicule utilisable pour des manœuvres normales et ne sollicitant pas trop les dérives des pneumatiques, **nous ne considérons que la plage de pseudo-glisement linéaire**. De ce fait les forces des pneumatiques peuvent être approximées par les expressions (3.9).

3.3.1.1 Angle de dérive d'un pneumatique

L'angle de dérive d'une roue i est l'angle formé entre l'orientation de la roue (angle de braquage δ_i) et l'orientation de son vecteur de vitesse (θ_{vi}) (figure 3.5) :

$$\alpha_i = \delta_i - \theta_{vi} \quad (3.10)$$

L'angle que forme le vecteur de vitesse de la roue avec l'axe longitudinal du véhicule peut être calculé connaissant les vitesses du centre de gravité du véhicule (CG) dans le plan OXY ($v_x, v_y, 0$), la vitesse de rotation "lacet" $\Omega=(0, 0, r)$ et les dimensions du véhicule (figure 3.2). Avec un changement de repère, on obtient pour chacune des roues :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan(\theta_{v1}) = \frac{v_y + l_f r}{v_x - \frac{d}{2} r} \\ \tan(\theta_{v2}) = \frac{v_y + l_f r}{v_x + \frac{d}{2} r} \\ \tan(\theta_{v3}) = \frac{v_y - l_r r}{v_x + \frac{d}{2} r} \\ \tan(\theta_{v4}) = \frac{v_y - l_r r}{v_x - \frac{d}{2} r} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

En remplaçant l'expression de θ_v dans (3.10) on obtient :

$$\begin{cases} \alpha_1 = \delta_f - \arctan\left(\frac{v_y + l_f r}{v_x - \frac{d}{2}r}\right) \\ \alpha_2 = \delta_f - \arctan\left(\frac{v_y + l_f r}{v_x + \frac{d}{2}r}\right) \\ \alpha_3 = -\arctan\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x - \frac{d}{2}r}\right) \\ \alpha_4 = -\arctan\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x + \frac{d}{2}r}\right) \end{cases} \quad (3.12)$$

Pour de faibles angles de dérive et en considérant que $(\frac{d}{2}|r| \ll v_x)$ l'expression (3.12) peut se réécrire :

$$\begin{cases} \alpha_{1,2} = \delta_f - \left(\frac{v_y + l_f r}{v_x}\right) \\ \alpha_{3,4} = -\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x}\right) \end{cases} \quad (3.13)$$

3.3.1.2 Taux de glissement

Le taux de glissement (λ) représente le rapport entre la vitesse de glissement le maximum des deux vitesses, linéaire, v_{xri} , et de roulement ($R_r w_i$: sa vitesse de rotation w_i multipliée par son rayon R_r). La vitesse de glissement (v_{sxi}) est la différence entre la vitesse linéaire d'une roue au point de contact pneu/sol v_{xri} et sa vitesse de roulement (voir figure 3.5) :

$$v_{sxi} = v_{xri} - R_r w_i \quad (3.14)$$

Cette vitesse est à l'origine des forces longitudinales agissant sur les roues (le véhicule).

$$\lambda_i = \frac{R_r w_i - v_{xri}}{\max(v_{xri}, R_r w_i)} \quad (3.15)$$

D'après cette expression, au freinage, la valeur de (λ) est négative et devient positive en accélération .

3.3.2 Modèle d'efforts de Coulomb/Burckhardt

Dans le modèle de frottement de Coulomb, les forces longitudinales (respectivement latérales) d'un pneumatique sont fonction de la force normale F_{zi} appliquée sur le pneumatique multipliée par un adhérence mobilisée en longitudinal, notée (μ_{longi}) (respectivement en latéral (μ_{lati})) telles que :

$$\begin{cases} F_{xi} &= \mu_{longi} F_{zi} \\ F_{yi} &= \mu_{lati} F_{zi} \end{cases} \quad (3.16)$$

Où :

$$\begin{cases} \mu_{longi} &= \mu_{resi} \frac{\lambda_i}{s_i} \\ \mu_{lati} &= \mu_{resi} \frac{\tan(\alpha_i)}{s_i} \end{cases} \quad (3.17)$$

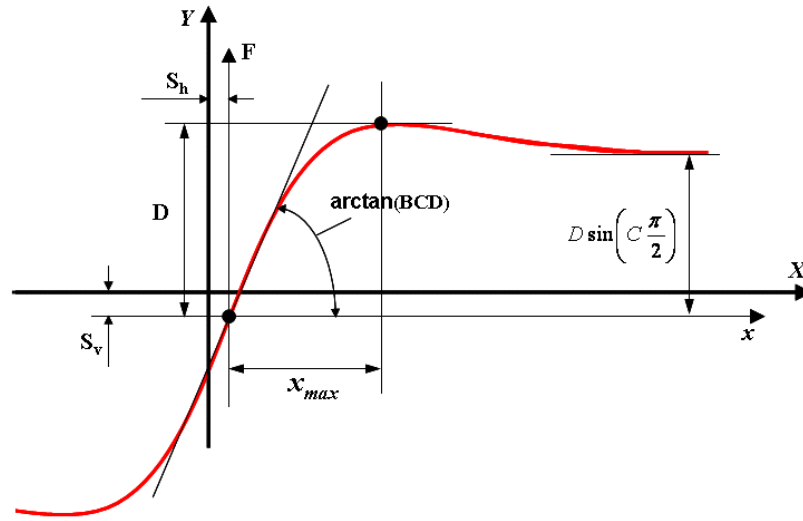


FIGURE 3.5 – Courbe caractéristique selon le modèle de Pacejka [123]

Elle est en fonction de la résultante, s_i , du glissement longitudinal, λ_i , et l'angle de la dérive latérale de la roue, α_i :

$$s_i = \sqrt{\lambda_i^2 + \tan(\alpha_i)^2} \quad (3.18)$$

L'adhérence mobilisée sur chaque roue est calculée en utilisant la formule de Burckhardt donnée par [108] :

$$\mu_{resi}(s_i) = (c_1(1 - e^{-c_2 s_i}) - c_3 s_i) e^{(-c_4 s_i V_{cg})} (1 - c_5 F_{zi}^2) \quad (3.19)$$

Avec V_{gc} représente la vitesse du véhicule au centre de gravité, les paramètres c_1 , c_2 et c_3 dépendent du type de sol, c_4 est en fonction de la vitesse maximale de conduite et c_5 en fonction de la charge maximale appliquée sur la roue.

Un des modèles les plus utilisés dans la littérature est, sans doute, le modèle statique de Pacejka.

3.3.3 Modèle de Pacejka

Le modèle de Pacejka est basé sur une représentation mathématique du comportement dynamique du pneumatique à l'aide de fonctions analytiques permettant de reproduire les mesures effectuées sur un pneumatique en banc d'essai [100]. La formule analytique du modèle d'effort de Pacejka, surnommée "la formule magique de Pacejka", est issue des relevés expérimentaux et son expression est donnée par [100] :

$$F_{x,y}(\lambda, \alpha) = D \sin \left(C \arctan[B(1 - E)(\lambda, \alpha) + E \arctan(B(\lambda, \alpha))] \right) \quad (3.20)$$

Les paramètres B , C , D et E dépendent de la force normale appliquée sur le pneumatique, de l'angle de carrossage, des caractéristiques physiques du pneumatique et de la chaussée, de la nature de leur contact.

La figure 3.5 montre qu'à partir de l'observation de la courbe caractéristique des efforts d'un pneumatique, il est possible de déterminer les paramètres principaux B , C et D . Ce modèle quasi-statique non-linéaire permet de calculer les forces longitudinales, latérales, ainsi que le moment d'auto alignement.

3.4 Expressions du modèle de véhicule simplifié

Nous décrivons dans cette partie les équations dynamiques du modèle bicyclette du véhicule à 3 DDL. Ce modèle peut être obtenu en posant l'hypothèse suivante :

Hypothèse 4 Les forces des roues du même essieu sont identiques.

De cette hypothèse, on peut remplacer chaque essieu par une roue équivalente. On adopte la notation f pour désigner la roue avant et r pour la roue arrière.

En plus des forces des pneumatiques qui agissent sur le véhicule, nous considérons une force du vent latérale (f_w), ayant comme centre d'impact le point distant de l_w en avant du centre de gravité du véhicule (voir figure 3.6). Nous introduisons, également, les forces aérodynamiques longitudinale et latérale qui sont proportionnelles au carré des vitesses du véhicule, agissant dans le sens inverse d'au mouvement .

Ce qui donne :

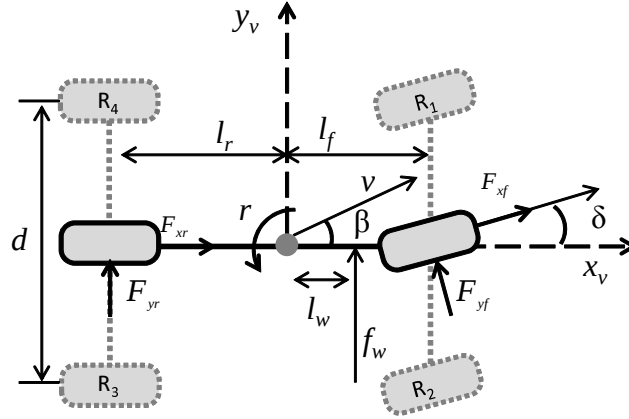


FIGURE 3.6 – Représentation du modèle bicyclette à partir d'un modèle quatre roues.

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y r) = F_{xf} \cos(\delta) - F_{yf} \sin(\delta) + F_{xr} - c_x v_x |v_x| \\ m(\dot{v}_y + v_x r) = F_{xf} \sin(\delta) + F_{yf} \cos(\delta) + F_{yr} + f_w - c_y v_y |v_y| \\ I_z \dot{r} = l_f (F_{xf} \sin(\delta) + F_{yf} \cos(\delta)) - l_r F_{yr} + l_w f_w \end{cases} \quad (3.21)$$

Avec $c_{\{x, y\}}$ est le coefficient de la traînée aérodynamique, respectivement, longitudinale et latérale.

On peut constater que ce modèle (3.22) présente des nonlinéarités dues aux fonctions trigonométriques, ces nonlinéarités peuvent être approximées en ajoutant les hypothèses suivantes :

Hypothèse 5 L'angle de braquage (δ) est petit.

De l'hypothèse 5, on peut approximer $\cos(\delta) \simeq 1$ et $\sin(\delta) \simeq \delta$, on déduit alors, que $F_{xf} \sin(\delta) \ll F_{yf}$ et $F_{yf} \sin(\delta) \ll F_{xf}$, ce qui nous permet de réécrire le modèle comme suit :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{F_{xf} + F_{xr} - c_x v_x |v_x|}{m} + v_y r \\ \dot{v}_y = \frac{F_{yf} + F_{yr} + f_w - c_y v_y |v_y|}{m} - v_x r \\ \dot{r} = \frac{l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + l_w f_w}{I_z} \end{cases} \quad (3.22)$$

En incluant le couple de traction issu du moteur et qui est appliqué aux roues avant (voir l'annexe A pour plus de détails) le modèle final devient :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{T_t - T_r}{I_{eff}} - \frac{c_x v_x |v_x|}{m} + v_y r \\ \dot{v}_y = \frac{F_{yf} + F_{yr} + f_w - c_y v_y |v_y|}{m} - v_x r \\ \dot{r} = \frac{l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + l_w f_w}{I_z} \end{cases} \quad (3.23)$$

Où : T_t et T_r sont le couple de traction du moteur et le couple résistant, I_{eff} est l'inertie effective et les forces latérales équivalentes de chaque essieu sont données par :

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f = C_f \left(\delta - \frac{v_y + l_f r}{v_x} \right) \\ F_{yr} = C_r \alpha_r = -C_r \left(\frac{v_y - l_r r}{v_x} \right) \end{cases} \quad (3.24)$$

telle que : $C_f = C_1 + C_2$ et $C_r = C_3 + C_4$ leurs coefficients de raideur latérale.

Nous considérons dans la suite que les deux modes longitudinal et latéral du véhicule sont découplés et peuvent être commandés séparément [12].

3.4.1 Positionnement latéral du véhicule sur la route

Une assistance au maintien de la voie a comme objectif d'apporter une aide au conducteur dans la tâche de conduite en continu en l'aidant à maintenir le véhicule sur la route, avec un bon positionnement. Le positionnement latéral du véhicule sur la route est défini par deux variables : l'écart latéral, qui représente la distance euclidienne du centre de gravité du véhicule au centre de la voie de circulation, et le cap relatif comme schématisé sur la figure 3.7.

Le cap relatif (erreur de cap) du véhicule sur la voie est la différence entre son cap (ψ_v) et le cap de la route (ψ_{des}), soit :

$$\psi_L = \psi_v - \psi_{des} \quad (3.25)$$

Par dérivation on obtient la dynamique de cette erreur :

$$\dot{\psi}_L = r - v_x \cos(\psi_L) \kappa \quad (3.26)$$

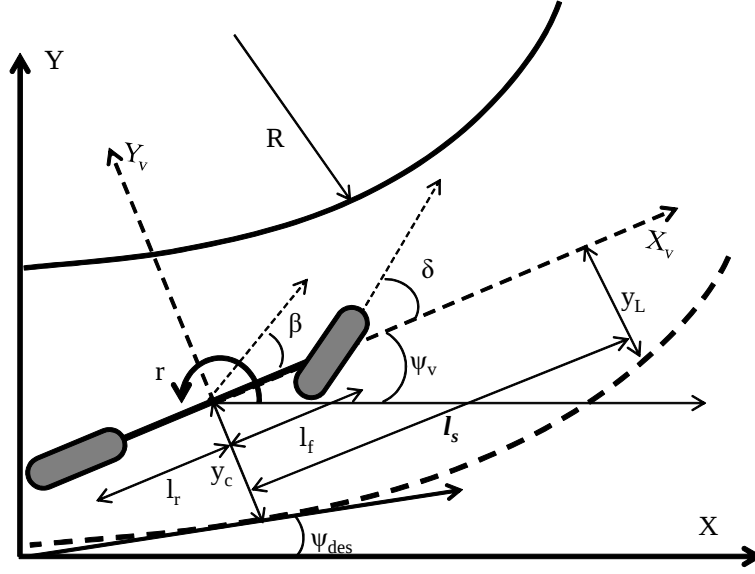


FIGURE 3.7 – Positionnement du véhicule sur la voie de circulation

Où κ est la courbure de la route qui est l'inverse du rayon de courbure.

Considérant une faible erreur de cap (ψ_L), on peut approximer $\cos(\psi_L) \simeq 1$ ce qui permet d'écrire :

$$\dot{\psi}_L = r - v_x \kappa \quad (3.27)$$

Le conducteur durant sa conduite anticipe ses manœuvres et ne régule pas l'écart latéral du centre de gravité du véhicule (y_c) mais plutôt l'écart latéral à une distance l_s à l'avant du véhicule. D'après la figure (3.7) :

$$y_L = y_c + l_s \sin(\psi_L) \quad (3.28)$$

La dérivation de cette équation permet d'obtenir la dynamique de l'écart latéral en avant du véhicule :

$$\dot{y}_L = v_y + l_s r + v_x \psi_L \quad (3.29)$$

En résumé, la dynamique du positionnement latéral du véhicule sur la route est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{y}_L = v_y + l_s r + v_x \psi_L \\ \dot{\psi}_L = r - v_x \kappa \end{cases} \quad (3.30)$$

Dans le cas pratique, ces deux variables de positionnement sont données généralement par un système de vision permettant la reconnaissance des marquages de la route (voir [88], par exemple, pour plus de détails)

3.4.2 Système de direction avec assistance électrique

Dans le présent travail, comme introduit dans la section 2.10, nous ne recherchons pas à automatiser complètement le contrôle latéral du véhicule, mais notre objectif est la conception

d'un système partageant le contrôle du véhicule en permanence et de façon continue avec le conducteur humain. L'organe le plus utilisé par le conducteur durant la conduite est le volant. Avec celui-ci, le conducteur positionne le véhicule dans l'environnement. Mais le rôle du volant ne se limite pas uniquement à cette fonction de contrôle. Le volant restitue au conducteur une partie des efforts qui s'exercent sur l'essieu avant du véhicule, grâce à quoi, le conducteur dispose d'informations sur l'état de la route (sèche, glissante, déformations, ...etc), l'état de gonflement des roues...etc.

En raison de cet échange "d'efforts" entre le conducteur et le véhicule, l'utilisation du couple de braquage comme signal de commande est le choix le plus approprié pour la conception d'une assistance au contrôle latéral active permettant ou tolérant les actions du conducteur.

Dans l'étude réalisée dans [92], les auteurs ont opéré une comparaison entre une commande en angle de braquage (ne nécessitant pas la modélisation du système de direction) et une commande en couple de braquage. Ils ont conclu que la commande en angle *est robuste vis-à-vis des perturbations de couples externes, comme le couple d'autoalignement mais aussi celui du conducteur, et rejette toute intervention en couple sur le système de direction*, ce qui n'est pas le cas dans une commande en couple. Ainsi, en faisant le choix d'une commande en angle, les actions du conducteur sur la colonne de direction seraient assimilées à des perturbations et donc rejetées (perturbation sur un asservissement de l'angle). Cette caractéristique de la commande en angle rend ce choix impropre au développement d'une commande latérale partagée.

Aussi, l'introduction d'une assistance active, agissant sur le système de direction du véhicule pour le guider, interagira immédiatement avec le conducteur. Afin de quantifier le ressenti du conducteur au couple de commande, la colonne de direction est modélisée.

La figure 3.8 représente un système de direction de véhicule simplifié équipé d'un capteur de couple mesurant le couple appliqué sur la colonne par le conducteur et d'un moteur électrique permettant d'injecter un couple de braquage supplémentaire dans la colonne de direction.

En appliquant les lois fondamentales de la dynamique en bas de la colonne, on retrouve :

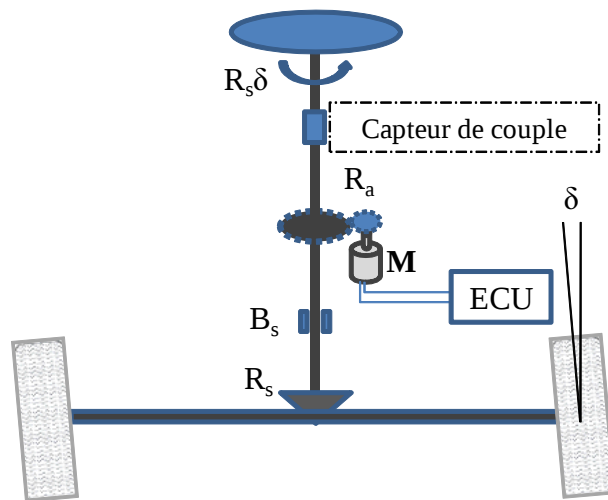


FIGURE 3.8 – Représentation d'un système de direction assistée

$$I_s \ddot{\delta} + B_s \dot{\delta} = T_d + T_m - T_{al} \quad (3.31)$$

Où δ (comme indiqué sur la figure 3.8) est l'angle de braquage des roues avant, I_s est le moment d'inertie équivalent du système de direction et B_s son coefficient d'amortissement équivalent. T_d est le couple appliqué par le conducteur, T_m est le couple du moteur électrique et T_{al} est le couple d'auto-alignement.

Pour le calcul du couple d'auto-alignement il est nécessaire de considérer le point d'application des forces latérales des roues (figure 3.9) : La force latérale résultante d'un pneumatique (3.24) ne s'applique pas sur le point de projection du centre de la roue sur la bande de roulement mais s'applique en un point en retrait du centre du pneumatique d'une distance (η_t) (figure 3.9). Le couple d'autoalignement peut être modélisé par le modèle suivant [109] [107] :

$$T_{al} = \eta_t F_{yf} = \eta_t C_f \left(\delta - \frac{v_y + l_f r}{v_x} \right) \quad (3.32)$$

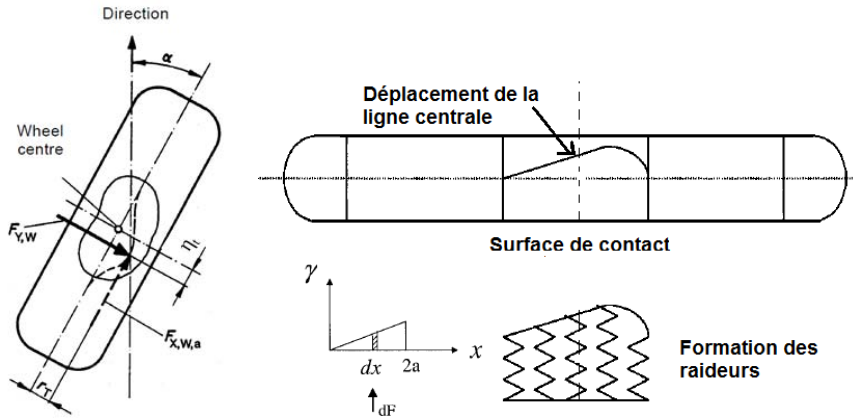


FIGURE 3.9 – Point d'application de la force latérale d'un pneumatique [109] [107]

Pour une simplification de notation, nous négligeons la dynamique du moteur électrique (puisque elle est plus rapide que à celle du système de direction) et adoptons la notation $T_c = T_m$ pour le couple de commande. La dynamique simplifiée du système de direction s'écrit alors :

$$J_s \ddot{\delta} = T_d + T_c - \eta_t C_f \left(\delta - \frac{v_y + l_f r}{v_x} \right) - B_s \dot{\delta} \quad (3.33)$$

3.4.3 Modèle bicyclette du véhicule sur la route

En négligeant les forces aérodynamiques (i.e $c_y = 0$) la représentation d'état du modèle bicyclette (3.23) augmenté du modèle de positionnement latéral du véhicule sur la route (3.30) et du système de direction du véhicule (3.33) avec comme variables d'état $x_v = [v_y \ r \ \psi_L \ y_L \ \delta \ \dot{\delta}]^T$, devient alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_v = A x_v + B_u u + B_w w \\ y_v = C x_v \end{cases} \quad (3.34)$$

L'entrée du système est le couple délivré par la commande additionné à celui du conducteur ($u = T_c + T_d$) et le vecteur de perturbation $w = [f_w, \kappa]$ contient la force latérale du vent et la courbure de la route. Les matrices du système 3.34 sont données comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & v_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ T_{s1} & T_{s2} & 0 & 0 & T_{s3} & T_{s4} \end{pmatrix}, B_u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \end{pmatrix}, B_w = \begin{pmatrix} e_1 & 0 \\ e_2 & 0 \\ 0 & -v_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{C_r + C_f}{mv_x}, \quad a_{12} = -v_x + \frac{l_r C_r - l_f C_f}{mv_x}, \quad b_1 = \frac{C_f}{m}, \quad e_1 = \frac{1}{m} \\ a_{21} &= \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I_z v_x}, \quad a_{22} = -\frac{l_r^2 C_r + l_f^2 C_f}{I_z v_x}, \quad b_2 = \frac{l_f C_f}{I_z}, \quad e_2 = \frac{l_w}{I_z} \\ T_{s1} &= \frac{C_f \eta_t}{J_s R_s v_x}, \quad T_{s2} = \frac{C_f l_f \eta_t}{J_s R_s v_x}, \quad T_{s3} = -\frac{C_f \eta_t}{J_s R_s}, \quad T_{s4} = -\frac{B_s}{J_s} \end{aligned}$$

Les valeurs numériques des différents paramètres sont données en annexe A.

3.5 Modèle conducteur pour le suivi de voie

Afin d'étudier les interactions entre le conducteur et le système d'aide au maintien de voie, nous avons besoin d'un modèle conducteur permettant de simuler (imiter) le style de conduite d'un être humain.

La modélisation du conducteur ou de la tâche de conduite est une problématique étudiée depuis les années 1960 [144, 52, 102, 117, 120, 116]. L'objectif de ces études est le développement de modèles permettant la simulation, la réalisation, l'évaluation et la validation des systèmes d'assistance à la conduite. Dans [52] un modèle mathématique du conducteur est élaboré ayant comme entrée l'erreur latérale à une distance l_p en avant du véhicule. Un modèle à deux niveaux, anticipation et compensation, est proposé dans [27]. Le modèle utilise une région de la route "éloignée" à l'avant du véhicule pour l'anticipation et une région "proche" pour la compensation. Il a été démontré dans [71] que le conducteur se guide sur la route en regardant deux points nommés **le point proche** et **le point lointain**.

A partir de ce constat, les auteurs de [117] caractérisent les deux points par deux angles visuels portant la même nomination (θ_{near} et θ_{far} voir figure 3.10) et en exploitant les résultats de [27], ils proposent un modèle basé sur un contrôleur Proportionnel Intégral (PI) ayant comme entrées les deux variables de perception et en sortie l'angle de braquage.

Les auteurs de [120] ont proposé un modèle cybernétique intégrant la dynamique neuromotrice ainsi que les capacités anticipatoires et compensatoires du conducteur et ayant pour entrées les angles au point proche et au point lointain et pour sortie le couple de braquage. Son architecture est présentée sur la figure 3.11 où on peut distinguer le contrôle visuel anticipatoire, le

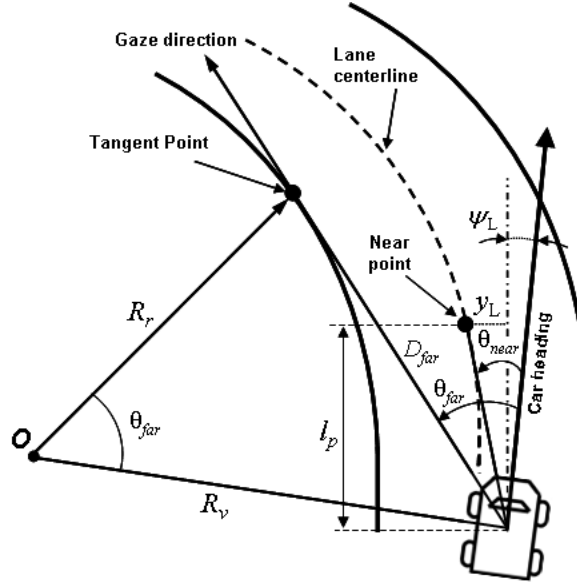


FIGURE 3.10 – Schéma des angles visuels utilisés par le conducteur pour le maintien de voie [120]

contrôle visuel correctif (compensatoire) ainsi que le retour kinesthésique dans le processus de braquage.

Ces différents niveaux de contrôle sont modélisés par les transferts suivants :

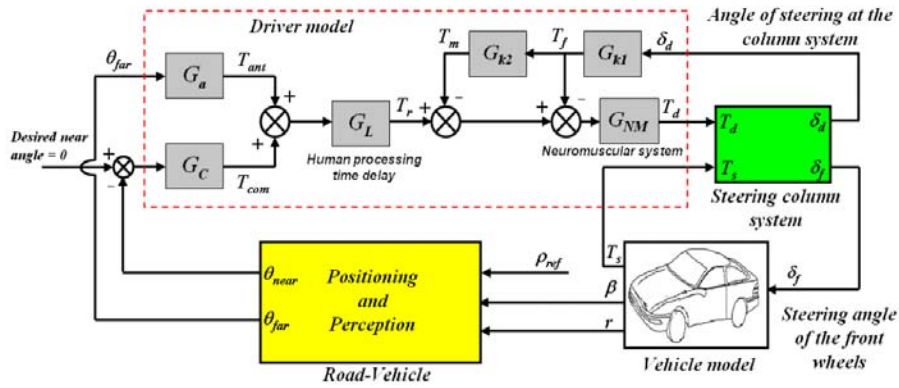


FIGURE 3.11 – Structure du modèle conducteur pour le maintien de voie proposé dans [120]

Le comportement anticipatoire est représenté par un gain proportionnel à l'angle visuel au point tangent du virage θ_{far} ce qui donne :

$$G_a(s) = K_a \quad (3.35)$$

Le comportement compensatoire est modélisé par la fonction de transfert G_c ayant pour entrée l'angle θ_{near} tel que :

$$G_c(s) = K_c \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \quad (3.36)$$

Avec K_c représente le gain de l'action proportionnelle du conducteur par rapport à l'erreur au niveau de l'angle visuel proche T_L et T_I sont les constantes de temps, respectivement, d'avance et de retard

Les activités du traitement sensoriel dans le système nerveux central et périphérique qui représentent le délai de traitement des informations visuelles est modélisé par un retard pur :

$$G_L(s) = e^{-\tau s} \quad (3.37)$$

La dynamique neuromusculaire est approximée par un filtre de premier ordre avec une constante de temps T_{nm} ;

La compensation kinesthésique est divisée en deux parties : la première représente la perception par le conducteur du couple résistant au volant modélisé par la fonction de transfert

$$G_{k1} = K_D \frac{s}{s + \frac{1}{T_1}} \quad (3.38)$$

La seconde partie est introduite pour rajouter un couple additionnel afin de compenser le couple résistant perçu au niveau de la colonne de direction :

$$G_{k2} = K_G \frac{T_{k1}s + 1}{T_{k2}s + 1} \quad (3.39)$$

Les paramètres du modèle sont en partie supposés connus (T_{nm} , T_1 , τ_p , K_D) et le reste est identifiés (voir [120] pour plus de détails). C'est ce modèle qui est retenu dans ce travail pour les simulations de conduite partagée qui fera l'objet du chapitre 5.

3.6 Présentation de l'environnement de travail SHERPA

Dans ce travail de thèse au sein de l'équipe ASHM (Automatique et système homme Machine) nous avons utilisé le simulateur de conduite interactif SHERPA-LAMIH acronyme de "Simulateur Hybride d'Etudes et de Recherche de PSA pour l'Automobile". Le simulateur est une copie du simulateur développé par le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën. Il est utilisé principalement pour des projets de recherche concernant le développement et l'évaluation d'ADAS ainsi que l'étude des comportements de conduite et leur impact sur la sécurité routière. Depuis son installation initiale en septembre 1997, il a subi de nombreuses évolutions visant à améliorer le réalisme et également à répondre aux besoins toujours croissants des projets de recherche.

SHERPA-LAMIH se présente sous la forme d'un véhicule Peugeot 206 fixé sur une plateforme mobile six axes (figure 3.12), le tout positionné face à cinq écrans plats assurant un champ visuel de 240°.

SHERPA-LAMIH repose sur une architecture informatique distribuée structurée autour d'un anneau en fibre optique reliant une quinzaine de stations de travail de type PC (voir la figure



FIGURE 3.12 – Le simulateur SHERPA-LAMIH

3.13). Chaque fonction (module sur la figure) du simulateur est prise en charge par un ou plusieurs PC connecté(s) à l’anneau via une carte à mémoire réflexive (Vmic). Les communications s’effectuent, ainsi, par partage de mémoire, ce qui permet de satisfaire aux contraintes ”temps réel” inhérentes aux applications de simulation interactive.

Les principaux modules composant SHERPA-LAMIH sont :

Gestion des entrées/sorties cabine : Les actions du conducteur sur les organes de commande sont scrutées à une fréquence de $1000Hz$. Les différents voyants et indicateurs du véhicule sont naturellement tous opérationnels.

Modèle dynamique du véhicule : SHERPA-LAMIH utilise le modèle dynamique ARHMM². Les calculs sont effectués à la fréquence de $120 Hz$ sur une station de travail PC dédiée. Cette machine assure également un rôle de superviseur principal pour l’ensemble de l’appliquatif SHERPA. ARHMM est un logiciel métier de dynamique véhicule. Développé à l’origine par le GIE SARA qui regroupait PSA, Renault et l’INRETS. L’objectif était de développer un modèle de véhicule destiné à être intégré à un simulateur de conduite automobile. Il est devenu par la suite un outil PSA. L’objectif initial imposait deux contraintes majeures : la première d’être représentatif du comportement d’un véhicule dans toute la gamme d’utilisation d’un véhicule réel, et la deuxième d’avoir un temps de calcul très faible afin de pouvoir s’exécuter en temps réel. Le modèle de dynamique du véhicule -noyau de calcul- est développé en C++ [40] ;

Génération des images de synthèse : Depuis janvier 2010, les images sont générées par un module visuel SCANeR issu du simulateur développé par la société OKTAL. La scène routière est restituée au moyen de cinq canaux graphiques assurant un champ de vision total de 240° . Chacune des cinq images est projetée sur un écran plat (environ 4 m de diagonale pour les 3 écrans centraux) via des vidéoprojecteurs DLP (projectiondesign F22 sx+). Pour la rétrovision, trois images indépendantes sont calculées pour chaque rétroviseur

2. ARHMM : Advanced Road Handling Multi-body Model

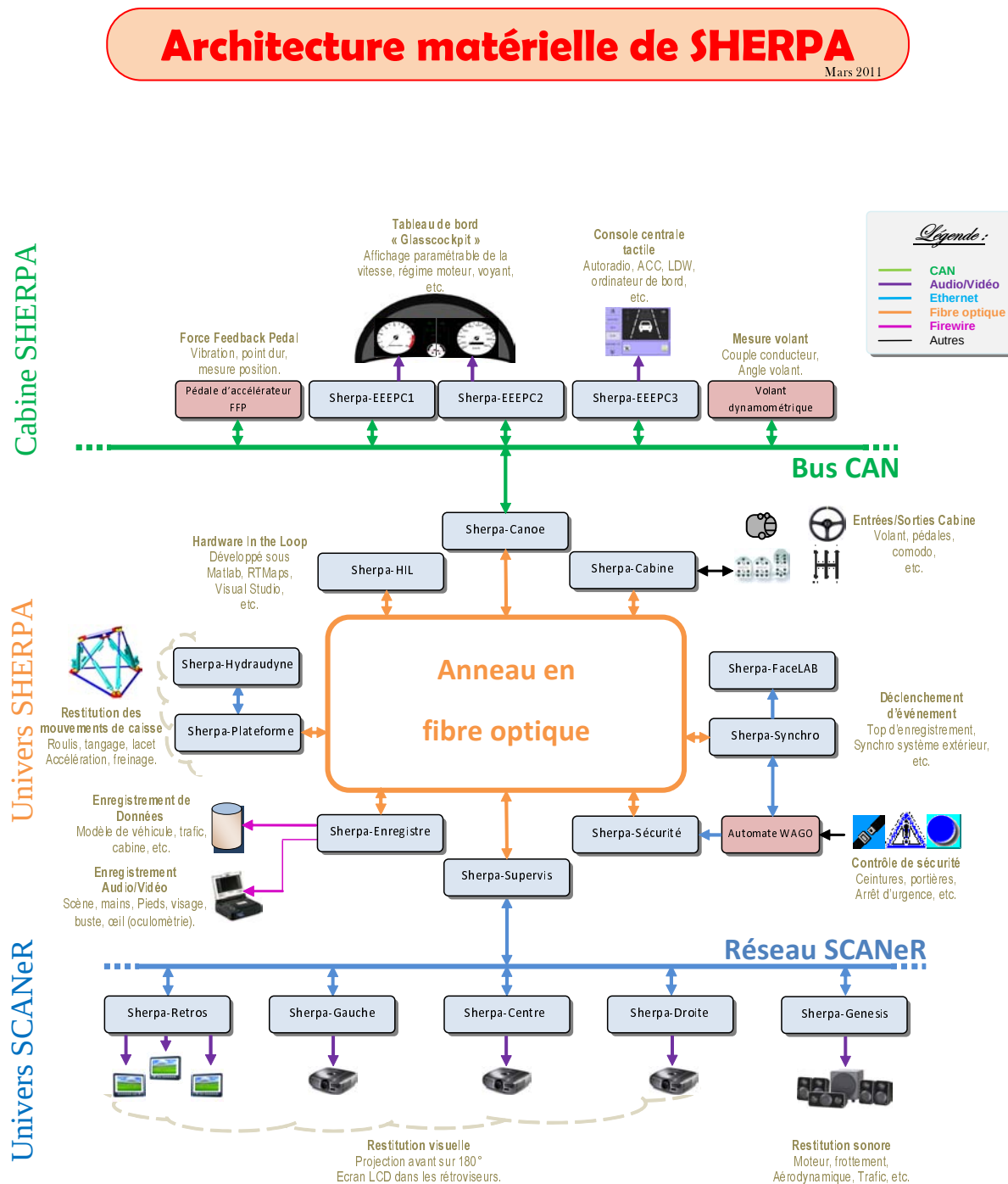


FIGURE 3.13 – Architecture matérielle du SHERPA-LAMIH

et affichée sur un mini écran LCD de 6". Ces huit canaux graphiques sont alimentés par un cluster de cinq stations de travail PC qui communiquent avec le superviseur principal via des liaisons TCP/IP, le superviseur étant lui-même relié physiquement à l'anneau en fibre optique.

La résolution des images est de 1280×1024 pixels pour les canaux avant et de 1024×768

pour les canaux arrière. La fréquence d’affichage est de $30Hz$, fréquence suffisante pour assurer une bonne fluidité des images ;

Génération de l’ambiance sonore : Depuis novembre 2010, le simulateur est équipé du générateur sonore GeneCARS développé par la société Genesis.

GeneCARS est un système de synthèse sonore temps réel permettant de restituer les bruits du véhicule (bruits moteur, bruits aérodynamiques, bruits de roulement, crissements de pneus, bruit du démarreur) et également les bruits du trafic environnant. Il fonctionne sur un PC dédié, piloté par le superviseur principal via une liaison TCP/IP. La restitution sonore est assurée par un ensemble de sept haut-parleurs (de marque FOCAL) : deux ensembles boomer/tweeter à l’avant, deux haut-parleurs à l’arrière, et un caisson de basses placé sous le siège passager avant ;

Pilotage de la plate-forme six axes : Une plate-forme mobile six axes (plate-forme "Gough-Stewart" de marque BOSCH-Rexroth) équipe le simulateur depuis 2005. Cette plate-forme se compose de six vérins électromécaniques autorisant une charge utile de 2,5 tonnes. Deux PC interviennent pour le pilotage de l’hexapode. Le premier, connecté à l’armoire de puissance, assure la commande de "bas niveau" c’est-à-dire les asservissements ainsi que les sécurités. Il est relié via une liaison TCP/IP au second PC, connecté lui à l’anneau en fibre optique, et qui génère les commandes de "hauts niveaux" à une fréquence de $60Hz$, à partir de données issues du modèle dynamique ARHMM. Les lois de commande de l’hexapode sont spécifiques au simulateur SHERPA ;

Enregistrement des données et synchronisation des périphériques : Une station de travail PC est entièrement dédiée à cette tâche. Elle permet d’enregistrer simultanément des données issues du simulateur et des données provenant de divers capteurs "extérieurs". Il est ainsi possible, par exemple, de mesurer la direction du regard du conducteur ou encore sa fréquence cardiaque en garantissant une parfaite synchronisation avec les données issues du simulateur. L’enregistrement s’effectue à la fréquence maximale de $120Hz$ (généralement $30Hz$). La station d’archivage pilote également deux magnétoscopes de type mini DV (via liaison FireWire).

3.6.1 Outils pour la mise au point des "scénarios"

L’environnement routier est entièrement paramétrable, la "base de données routière" étant éditée en fonction des besoins spécifiques de chaque expérimentation à l’aide du logiciel SCANeR studio "terrain" (outil OKTAL). Cet environnement peut représenter tous types de route (autoroute, route nationale, ou encore zone urbaine) organisés en réseau grâce à des échangeurs et carrefours.

La majorité des expérimentations fait appel à la notion de "scénario de trafic", scénario visant à placer le conducteur dans des conditions les plus réalistes possibles en ce qui concerne ses interactions avec les autres usagers. Généralement, le trafic est composé de deux types de mobiles : des véhicules "libres", qui évoluent de manière autonome et destinés à assurer un



FIGURE 3.14 – Couplemètre et le Driver Monitoring équipant SHERPA-LAMIH

certain flux de véhicules, et des véhicules sous contrôle, destinés à avoir des interactions directes avec le véhicule sujet. Ils vont par exemple refuser une priorité à droite, faire une "queue de poisson", effectuer un freinage brusque intempestif, etc. Le trafic est géré par un automate au moyen d'un ensemble de règles (module spécifique SHERPA). Si nécessaire, l'expérimentateur a la possibilité d'agir de manière interactive sur les véhicules du trafic.

3.6.2 Outils pour l'analyse du comportement des conducteurs

Le simulateur permet d'archiver un grand nombre de données provenant du modèle dynamique ou encore des entrées/sorties cabine. Des capteurs supplémentaires sont néanmoins souvent nécessaires, pour permettre notamment des mesures "physiologiques" sur le conducteur. Au fil des projets, le laboratoire a développé un ensemble d'outils méthodologiques et logiciels permettant d'analyser conjointement l'ensemble des données recueillies, tant quantitatives (issues du simulateur et des capteurs périphériques) que qualitatives (obtenues à partir de l'examen des enregistrements vidéo, via les réponses à des questionnaires, etc.). Les outils développés concernent notamment les mouvements oculaires et les mouvements de tête, la fréquence cardiaque et l'activité électrodermale.

Dans le cadre du projet **ABV**, SHERPA-LAMIH est équipé d'un couplemètre mesurant le couple du conducteur au volant [24]. Ce capteur est indispensable pour l'étude des interactions du conducteur avec un système d'assistance à la conduite. Le simulateur est équipé aussi d'un DM(Driver Monitoring) fourni par Continental Automotive et permettant de surveiller l'état de fatigue du conducteur. Ces deux éléments essentiels sont rapportés sur la figure 3.14.

3.6.3 Circuit de test de conduite

Pour nos simulations numériques et interactives (sur SHERPA-LAMIH) nous utilisons une cartographie numérique de la piste de Satory (la partie routière) rapportée sur la figure 3.15 (<https://project.inria.fr/scoref/sator/>).

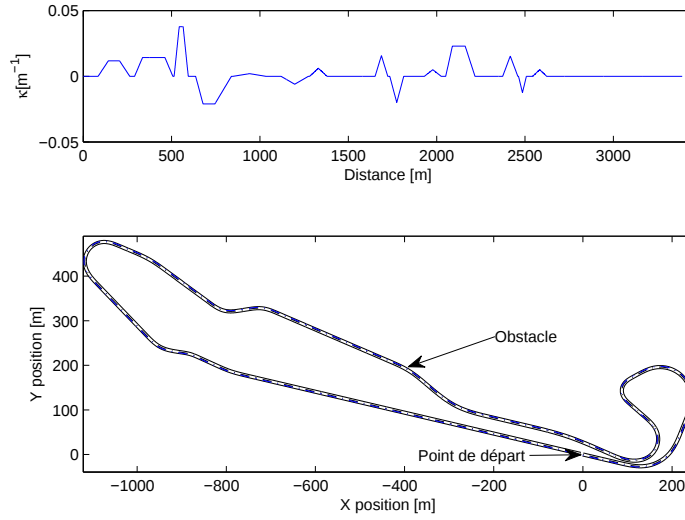


FIGURE 3.15 – La piste d’essais de Satory et la courbure de ses virages

3.7 Validation du modèle véhicule adopté sur SHERPA-LAMIH

Afin de pouvoir exploiter le modèle de véhicule adopté pour la synthèse de contrôleurs et d’observateurs valides pour y être intégrés, une validation du modèle est réalisée avec des mesures collectées sur le simulateur SHERPA-LAMIH.

Le modèle (3.34) est excité par le couple conducteur mesuré (figure 3.16-b) pour un parcours réalisé sur la piste de Satory reconstituée dans le simulateur avec des séquences de brusques changements de voies et des phases d’accélération-décélération (figure 3.16-a) pour exciter le système dans ses différents modes. Les résultats obtenus sont rapportés sur la figure 3.16 et les erreurs de validation pour les différentes variables sur la figure 3.17.

TABLE 3.1 – Quelques statistiques sur les erreurs de validation du modèle véhicule sur SHERPA-LAMIH

Erreur sur la Variable	Moyenne (10^{-4})	Maximum	Écart type
Vitesse latérale (m/s)	-6.346	0.135	0.0165
Vitesse de lacet ($^{\circ}/s$)	-78.8	3.878	0.6677
Vitesse angle volant ($^{\circ}/s$)	-10.4	8.28	1.25
Angle volant ($^{\circ}$)	-24.0	1.369	0.6149

Comme on peut le constater, le modèle développé donne une bonne approximation de la dynamique du modèle utilisé dans le simulateur SHERPA-LAMIH (ARHMM). Le modèle reproduit assez fidèlement le comportement global du véhicule comme en témoignent les résultats des comparaisons rapportés sur le tableau 3.1. A travers ces résultats on peut conclure que le

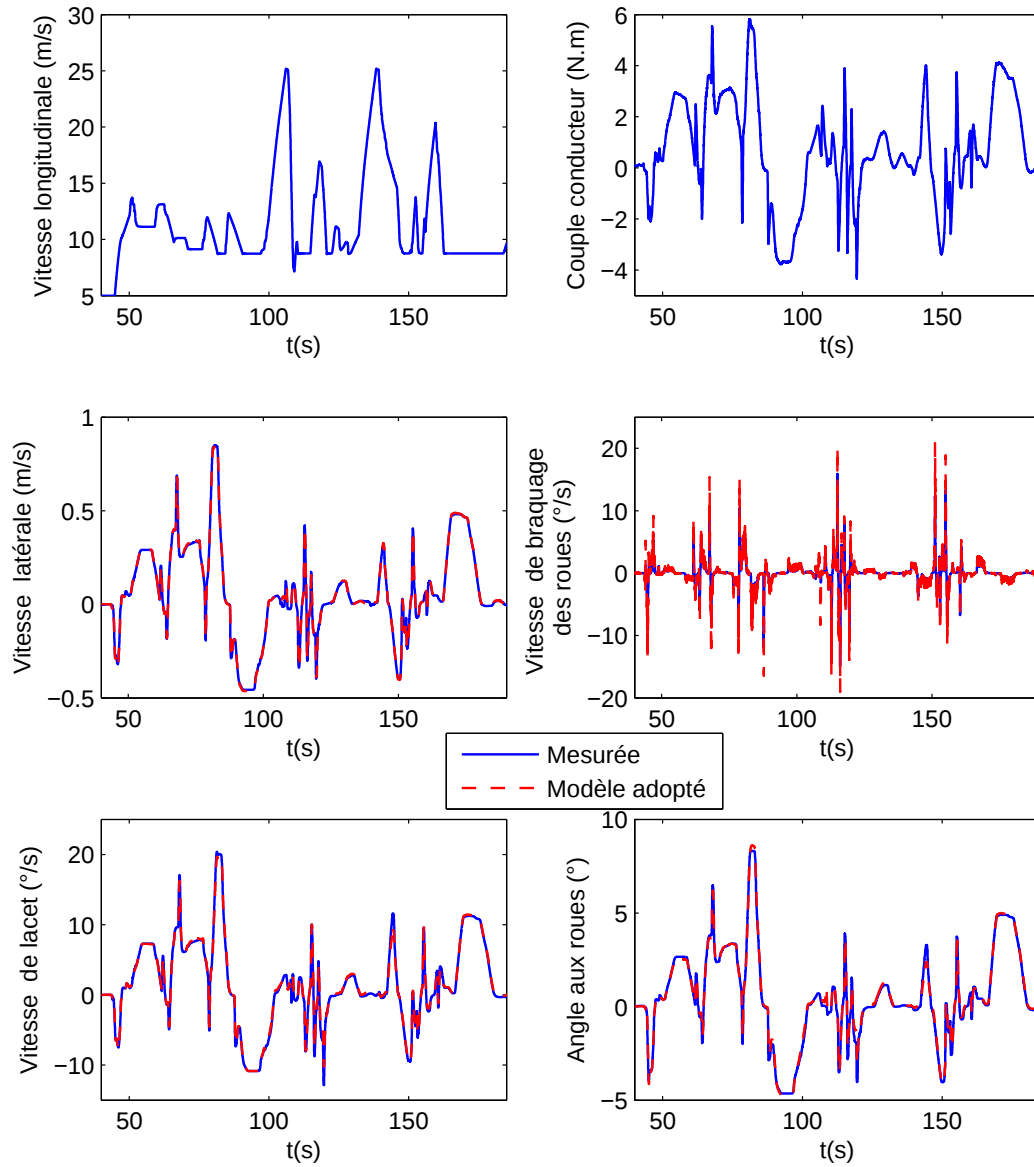


FIGURE 3.16 – Comparaison des sorties du modèle véhicule proposé aux données collectées sur SHERPA-LAMIH

modèle est valide et peut être utilisé pour la synthèse de lois de commande et d'observateurs applicables directement sur SHERPA.

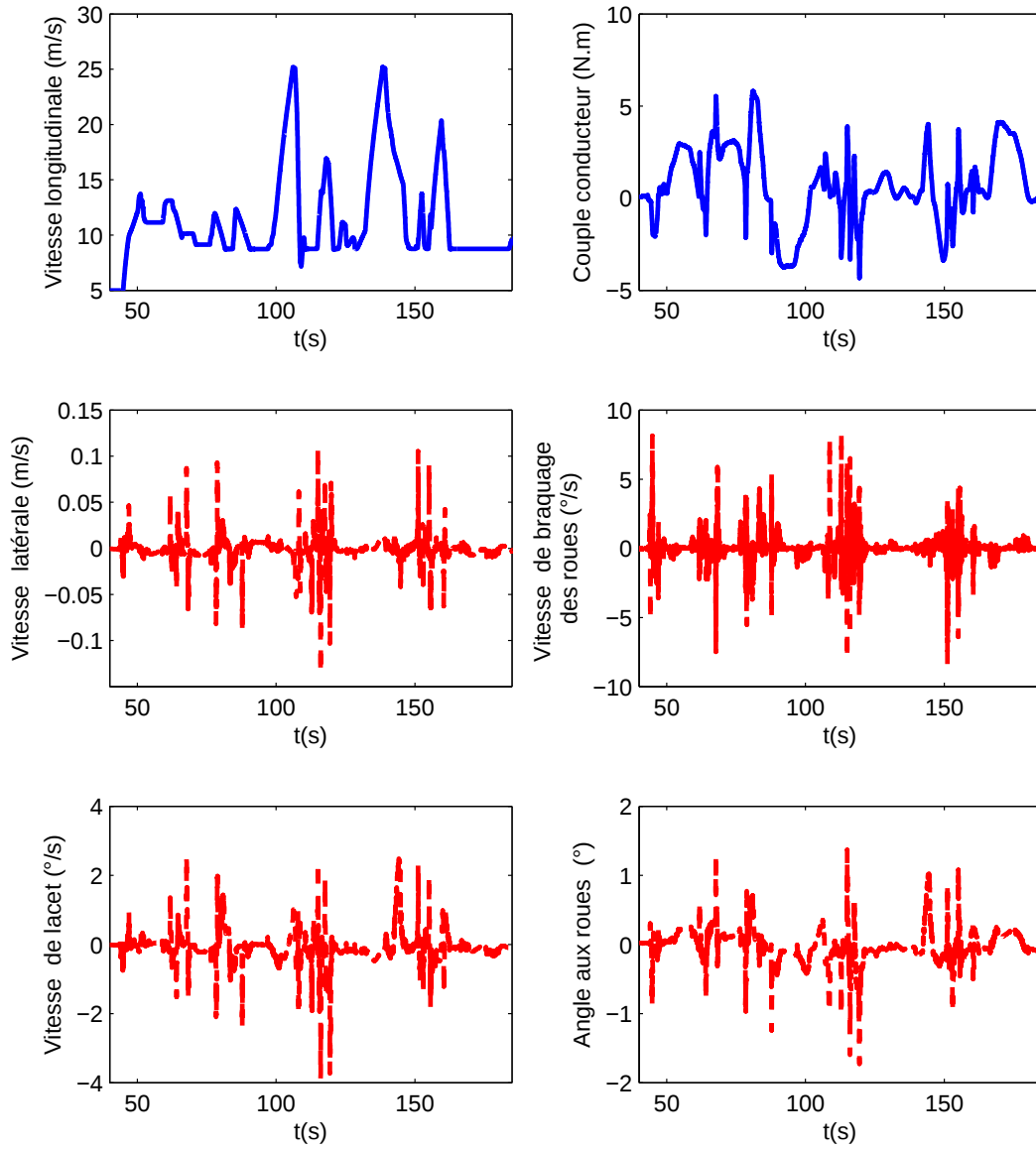


FIGURE 3.17 – Erreur de reproduction du modèle proposé en comparaison des données collectées sur SHERPA-LAMIH

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le modèle véhicule sur lequel sera basée la synthèse de contrôleurs et observateurs en vue de la conception de systèmes d'assistance au contrôle latéral coopératif. Ce modèle intègre la colonne de direction du véhicule pour pouvoir étudier les interactions automate-conducteur à travers les couples de braquage appliqués par chacun des

intervenants. Ensuite, pour répondre au besoin d'étudier les interactions entre un conducteur et un ADAS en simulation numérique, un modèle conducteur pour le maintien de voie a été introduit.

En fin de chapitre, l'environnement de travail (SHERPA-LAMIH) est présenté et le modèle du véhicule adopté est validé sur des mesures issues du simulateur de conduite. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les simplifications posées pour l'obtention du modèle, sont parfaitement compatibles avec le cas d'application considéré.

Chapitre 4

Commande type TS pour le maintien de voie

Sommaire

4.1	Introduction	59
4.2	Préliminaires sur les modélisation Takagi-Sugeno	60
4.2.1	Construction de modèles TS	62
4.2.2	Quelques lemmes utiles	63
4.3	Représentation TS du modèle du véhicule	64
4.3.1	Validation du modèle TS du véhicule	65
4.3.1.1	Validation en simulation	65
4.3.1.2	Validation sur des données collectées sur SHERPA	67
4.4	Stabilité et stabilisation d'un modèle TS	69
4.4.1	Stabilité d'un modèle TS	69
4.4.2	Stabilisation d'un modèle TS	71
4.4.3	Problème de régulation	72
4.5	Commande TS pour un maintien de voie	75
4.6	Robustesse du contrôleur	79
4.6.1	Rejet d'une perturbation	80
4.7	Conclusion	80

4.1 Introduction

La logique floue est introduite à la base comme un outil permettant d'intégrer le raisonnement d'un expert pour la commande d'un procédé mal connu ou difficilement modélisable [148]. En 1975 Mamdani publie un ouvrage consacré au contrôle flou [81] et cinq ans plus tard, une première application a vu le jour : un fabricant danois de ciment F.L.Smith&Co. A/S s'est servi d'un appareil de contrôle flou pour réguler le fonctionnement d'un four. Mais l'application qui a rendu célèbre la logique floue, c'est bien le métro automatique de Sendai en 1987 au Japon. Dans cette

version de la logique floue, dite logique floue type Mamdani, il n'est pas nécessaire de disposer d'un modèle du système qu'on veut commander, pour élaborer un contrôleur (model-free control design).

Par la suite, une autre utilisation de la logique floue a vu le jour [128] : la modélisation floue de type Takagi-Sugeno (TS). Cette dernière est plus proche mathématiquement de la représentation des systèmes variants dans le temps, polytopiques ou LPV (Linear Parameters varying) [114].

Les modèles flous de type TS sont utilisés aussi bien pour la synthèse de lois de commande que la synthèse d'observateurs pour des systèmes non-linéaires continus ou discrets [114]. La modélisation ou représentation de type TS est une combinaison de modèles linéaires interconnectés par des fonctions scalaires non-linéaires variables dans le temps et ayant la propriété de somme convexe [129, 130, 115]. Le passage du modèle non-linéaire à sa représentation TS (dans un domaine compact des variables d'état) peut se faire de façon systématique en utilisant l'approche par secteurs non-linéaires [131].

L'étude de la stabilité et la stabilisation de ces modèles est généralement basée sur les fonctions de Lyapunov quadratique [131] et la résolution du problème de stabilité ou de stabilisation est souvent formulé sous forme d'inégalités matricielles linéaires : LMI (Linear Matrix Inequality) [39]. Dans ce cas, des algorithmes d'optimisation convexe sont généralement utilisés pour résoudre le problème ainsi formulé. Les premiers travaux sur la stabilisation des systèmes représentés par des modèles flous TS sont basés sur la fonction de Lyapunov quadratique [135]. Les lois de commande obtenues sont par retour d'état et ne permettent pas d'intégrer des contraintes de performance et/ou de robustesse. Par la suite d'autres structures de commande ont été mises au point : les auteurs de [131] et [47] proposent des lois de commandes par retour de sortie avec observateur, dans [63] une commande à retour d'état statique pour des systèmes incertains est proposée, une commande par retour de sortie dynamique est proposée dans [84].

Aujourd'hui, on peut dire que la logique floue a conquis presque tous les domaines de l'automatique et on trouve de nombreux travaux s'inspirant des méthodes de commande/observation appliquées aux systèmes linéaires. A titres d'exemples : des conditions existent pour des modèles TS avec incertitudes bornées [131], les systèmes avec retards [10][76], avec la prise en compte d'une atténuation H_∞ ou utilisant un problème mixte H_2/H_∞ [14], adaptatif [69] [70], optimal [145][136] ou systèmes hybrides [133, 132].

En automobile plusieurs des travaux utilisent la modélisation et commande TS en considérant les nonlinéarités des forces des pneumatiques [33, 32, 78, 99] pour des applications de stabilisation du véhicule. Dans [137] la synthèse d'une loi de commande longitudinale et latérale d'un véhicule en considérant un modèle bicyclette non-linéaire à été étudiée pour la réalisation d'un attelage virtuel.

4.2 Préliminaires sur les modélisation Takagi-Sugeno

La modélisation TS a été proposée par Takagi et Sugeno [128] comme un outil pour représenter les systèmes non-linéaires, les systèmes à paramètres variants et les systèmes incertains

de type :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \quad i = 1..r \end{cases} \quad (4.1)$$

sous forme d'un ensemble fini de règles SI...ALORS. Chacune des règles est de la forme :

Regle_i : Si $\rho_1(t)$ est M_{i1} ... ET ρ_l est M_{il} Alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \quad i = 1..r \end{cases} \quad (4.2)$$

Où le vecteur ρ contient les paramètres variants (non-linéarités) qui peuvent dépendre (ou pas) des variables d'état ou d'une perturbation externe (*doivent être mesurables ou estimées* [77]). $M_{ij} \in [0, 1]$ sont les fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous des prémisses. $x(t) \in \mathbf{R}^n$ est le vecteur d'état du système, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ et $y(t) \in \mathbf{R}^p$ sont, respectivement, le vecteur des entrées et le vecteur des sorties. $A_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbf{R}^{n \times m}$ et $C_i \in \mathbf{R}^{p \times n}$ sont les matrices -constantes- du i^{eme} sous-modèle linéaire.

En utilisant la multiplication comme interprétation des "ET" des prémisses, chaque i^{eme} sous-modèle est valide à un degré :

$$w_i(\rho) = \prod_{j=1}^l \mu(M_{ij}) \quad (4.3)$$

Tel que $\mu(M_{ij}) \in [0, 1]$ est le degrés d'appartenance de la variable ρ_j à la fonction M_{ij} .

En utilisant la somme pondérée pour le calcul du modèle TS global, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\rho)(A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(\rho)} \\ y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\rho)C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(\rho)} \quad i = 1..r \end{cases} \quad (4.4)$$

Si on note par $h_i(\rho) = \frac{w_i(\rho)}{\sum_{i=1}^r w_i(\rho)}$ le modèle TS global devient alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\rho)(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\rho)C_i x(t) \quad i = 1..r \end{cases} \quad (4.5)$$

Il est clair que les fonctions h_i vérifient la propriété de somme convexe, c'est à dire :

$$\begin{cases} h_i(\rho) \geq 0 \quad \forall i \\ \sum_{i=1}^r h_i(\rho) = 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Pour la lisibilité du manuscrit nous adoptons la notation h_i en remplacement de $h_i(\rho)$.

4.2.1 Construction de modèles TS

Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour représenter un modèle non-linéaire sous forme TS (4.5) :

1. Une première méthode utilise une identification à partir de mesures des entrées/sorties du système à défaut d'avoir un modèle mathématique de ce dernier [128].
2. Une deuxième méthode consiste à linéariser un modèle non-linéaire ou un système identifié autour de plusieurs points de fonctionnement et les relier par des fonctions non-linéaires [31].
3. Le dernier cas est celui pour lequel on dispose du modèle non-linéaire du système. Il est alors possible de construire sa représentation exacte TS dans un domaine compact des variables non-linéaires [143] [130].

Pour construire la représentation exacte TS d'un modèle non-linéaire, il est nécessaire que les nonlinéarités du modèle soient bornées [128]. La représentation exacte TS découle du lemme ci-dessous [48, 49].

Lemme 4.1 *Soit une fonction $f(x)$ bornée sur un intervalle $[x_1, x_2]$, alors cette fonction peut être représentée par deux fonctions $f_1(x)$, $f_2(x)$ vérifiant les propriétés*

$$f_1(x) \geq 0, f_2(x) \geq 0 \text{ et } f_1(x) + f_2(x) = 1$$

tel que :

$$f(x) = \alpha f_1(x) + \beta f_2(x) \quad (4.7)$$

avec : $\alpha = \underline{f}$, $\beta = \bar{f}$ et

$$f_1(x) = \frac{\bar{f} - f(x)}{\bar{f} - \underline{f}}, f_2(x) = \frac{f(x) - \underline{f}}{\bar{f} - \underline{f}}$$

$\bar{f} = \max(f)$ et $\underline{f} = \min(f)$

Exemple : Considérons le modèle non-linéaire suivant

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 1 & \cos(x_1) \\ f(t) & -1 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \cos(x_1) \\ 2 \end{pmatrix} u \quad (4.8)$$

Avec $f(t) \in [\underline{f}, \bar{f}]$ et $x_1 \in [-\pi, \pi]$

En considérant comme prémisses le vecteur $\rho = [x_1, f(t)]$, les fonctions d'appartenances de la nonlinéarité en x_1 sont :

$$M_1^1 = \frac{1 - \cos(x_1)}{2}, M_1^2 = \frac{1 + \cos(x_1)}{2}$$

Et celles de la fonction $f(t)$ sont :

$$M_2^1 = \frac{\bar{f} - f(t)}{\bar{f} - \underline{f}}, M_2^2 = \frac{f(t) - \underline{f}}{\bar{f} - \underline{f}}$$

En faisant les combinaisons $h_1 = \mu(M_1^1)\mu(M_2^1)$, $h_2 = \mu(M_1^1)\mu(M_2^2)$, $h_3 = \mu(M_1^2)\mu(M_2^1)$, $h_4 = \mu(M_1^2)\mu(M_2^2)$, on obtient les matrices des quatre sous-modèles TS tels que :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ \underline{f} & -1 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ \bar{f} & -1 \end{pmatrix}, B_1 = B_2 \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \underline{f} & -1 \end{pmatrix}, A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \bar{f} & -1 \end{pmatrix}, B_3 = B_4 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

4.2.2 Quelques lemmes utiles

Dans la suite l'équivalence de (4.9) à (4.10) appelée complément de Schur sera très utile :

Lemme 4.2 *Soit les matrices $R = R^T$ et $Y = Y^T$ de dimensions appropriées alors :*

$$\begin{cases} R > 0 \\ Y + X^T R X < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} Y & X^T \\ X & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (4.10)$$

Ce lemme permet de passer d'une contrainte quadratique en une contrainte LMI.

Supposant que la seule information concernant les h_i est leur propriété de somme convexe (4.6).

Lemme 4.3 [134] *Soit Υ_i des matrices de tailles appropriées alors la condition :*

$$\sum_{i=1}^r h_i \Upsilon_i < 0 \quad (4.11)$$

est vérifiée si :

$$\Upsilon_i < 0, \quad i = 1..r \quad (4.12)$$

Ce résultat est une condition suffisante qui par contre introduit plus de conservatisme puisqu'on ne tiens pas compte des fonctions h_i .

Dans le cas de double somme c'est à dire :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j \Upsilon_{ij} < 0 \quad (4.13)$$

Si on regarde le premier résultat du lemme (4.3), la solution est que : $\Upsilon_{ij} < 0, \forall (i, j) \in \{1..r\}^2$. Mais puisque $h_i h_j = h_j h_i$, le résultat peut s'écrire :

Lemme 4.4 [134] *La condition (4.13) est vérifiée si :*

$$\begin{cases} \Upsilon_{ii} < 0 \\ \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} < 0 \text{ pour } i = 1..r, j = i + 1..r \end{cases} \quad (4.14)$$

4.3 Représentation TS du modèle du véhicule

Rappelons que la représentation d'état du modèle latéral du véhicule discuté dans le chapitre précédent est :

$$\begin{cases} \dot{x}_v = Ax_v + B_u u + B_w w \\ y_v = Cx_v \end{cases} \quad (4.15)$$

Telle que :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{C_r + C_f}{mv_x} & -v_x + \frac{l_r C_r - l_f C_f}{mv_x} & 0 & 0 & \frac{C_f}{m} & 0 \\ \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I_z v_x} & -\frac{l_r^2 C_r + l_f^2 C_f}{I_z v_x} & 0 & 0 & \frac{l_f C_f}{I_z} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & v_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{C_f \eta_t}{J_s R_s v_x} & \frac{C_f l_f \eta_t}{J_s R_s v_x} & 0 & 0 & -\frac{C_f \eta_t}{J_s R_s} & -\frac{B_s}{J_s} \end{pmatrix}; B_u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \end{pmatrix}$$

$$B_w = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & \frac{l_w}{I_z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -v_x & 0 & 0 \end{pmatrix}^T.$$

Avec comme entrée du système le couple délivré par la commande additionné à celui du conducteur ($u = T_c + T_d$), les perturbations externes sont la force du vent latéral et la courbure de la route $w = [f_w, \kappa]$.

Comme on peut le constater, la matrice dynamique (A) du système (4.15) dépend de la vitesse longitudinale du véhicule en proportionnel v_x et en inverse v_x^{-1} . En supposant qu'elle est mesurable, la représentation exacte TS du modèle du véhicule (4.15) est obtenue en considérant les deux nonlinéarités $\rho_1 = v_x$ et $\rho_2 = v_x^{-1}$ comme deux paramètres variant dans un intervalle $[v_{min}, v_{max}]$.

D'après le lemme 4.1, les quatre fonctions d'appartenances, sont définies comme suit :

$$M_1^1 = \frac{\bar{\rho}_1 - \rho_1}{\bar{\rho}_1 - \underline{\rho}_1} = \frac{v_{max} - \rho_1}{v_{max} - v_{min}} \text{ et } M_1^2 = 1 - M_1^1$$

$$M_2^1 = \frac{\bar{\rho}_2 - \rho_2}{\bar{\rho}_2 - \underline{\rho}_2} = \frac{v_{min}^{-1} - \rho_2}{v_{min}^{-1} - v_{max}^{-1}} \text{ et } M_2^2 = 1 - M_2^1$$

La dynamique du modèle TS globale est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^4 h_i (A_i x + B u + B_{wi} w) \\ y = \sum_{i=1}^4 h_i C x \end{cases} \quad (4.16)$$

Avec :

$$h_1 = M_1^1.M_2^1, \quad h_2 = M_1^1.M_2^2$$

$$h_3 = M_1^2.M_2^1, \quad h_4 = M_1^2.M_2^2$$

et A_i , B , B_{wi} et C , $i = 1..4$ sont les matrices des quatre sous-modèles obtenues pour les combinaisons des extremums ρ_1 et ρ_2 : $[\overline{\rho_1}, \overline{\rho_2}]$, $[\overline{\rho_1}, \underline{\rho_2}]$, $[\underline{\rho_1}, \overline{\rho_2}]$, $[\underline{\rho_1}, \underline{\rho_2}]$. tels que :

$$A = \begin{pmatrix} -\rho_2 \frac{C_r + C_f}{m} & -\rho_1 + \rho_2 \frac{l_r C_r - l_f C_f}{m} & 0 & 0 & \frac{C_f}{m} & 0 \\ \rho_2 \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I_z} & -\rho_2 \frac{l_r^2 C_r + l_f^2 C_f}{I_z} & 0 & 0 & \frac{l_f C_f}{I_z} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \rho_2 \frac{C_f \eta_t}{J_s R_s} & \rho_2 \frac{C_f l_f \eta_t}{J_s R_s} & 0 & 0 & -\frac{C_f \eta_t}{J_s R_s} & -\frac{B_s}{J_s} \end{pmatrix} B_u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \end{pmatrix}$$

$$B_w = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & \frac{l_w}{I_z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad C = I_6$$

Nous considérons, dans un premier temps, que toutes les variables d'état sont mesurables d'où $C = I_6$ (la matrice identité de dimension 6).

4.3.1 Validation du modèle TS du véhicule

Afin de l'exploiter pour la synthèse de lois de commande, le modèle TS du véhicule (4.16) a été validé, en simulation, en comparant son comportement à celui du modèle véhicule originel (4.15), puis sur des données mesurées sur le simulateur de conduite SHERPA.

4.3.1.1 Validation en simulation

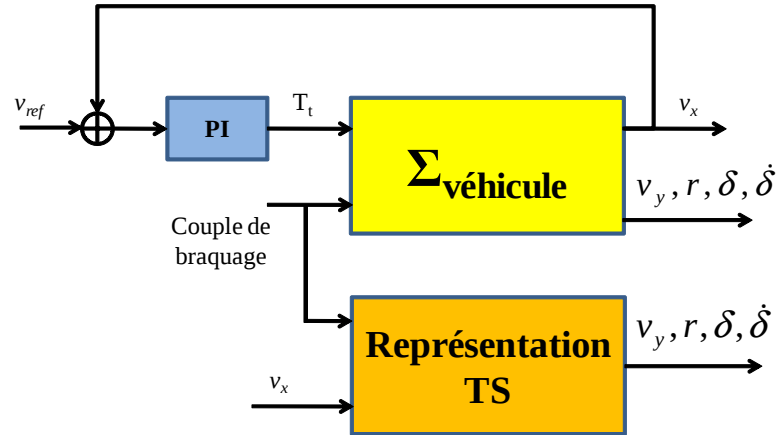


FIGURE 4.1 – Schéma de comparaison du modèle véhicule (4.15) à sa représentation TS (4.16).

Les deux modèles sont excités avec un couple d'entrée en signal carré d'une amplitude de $4.5 N.m$ et d'une fréquence de $0.25 Hz$ ($T = 4.5 \text{carre}(0.25 \times 2\pi t)$) avec la vitesse longitudinale variable dans l'intervalle $[7, 25] m.s^{-1}$ elle aussi en entrée du modèle TS (comme rapporté sur la figure 4.1).

Comme les dynamiques des modes longitudinal et latéral du véhicule telles que formulées dans (4.15) sont découplées, la régulation de la vitesse longitudinale est assurée par un contrôleur PI

réglé pour un bon suivi de consigne.

Les résultats de la comparaison des sorties des deux modèles ((4.15) et (4.16)) sont rapportés sur la figure 4.2. Comme on peut le constater, les sorties du modèle TS se superposent parfaitement

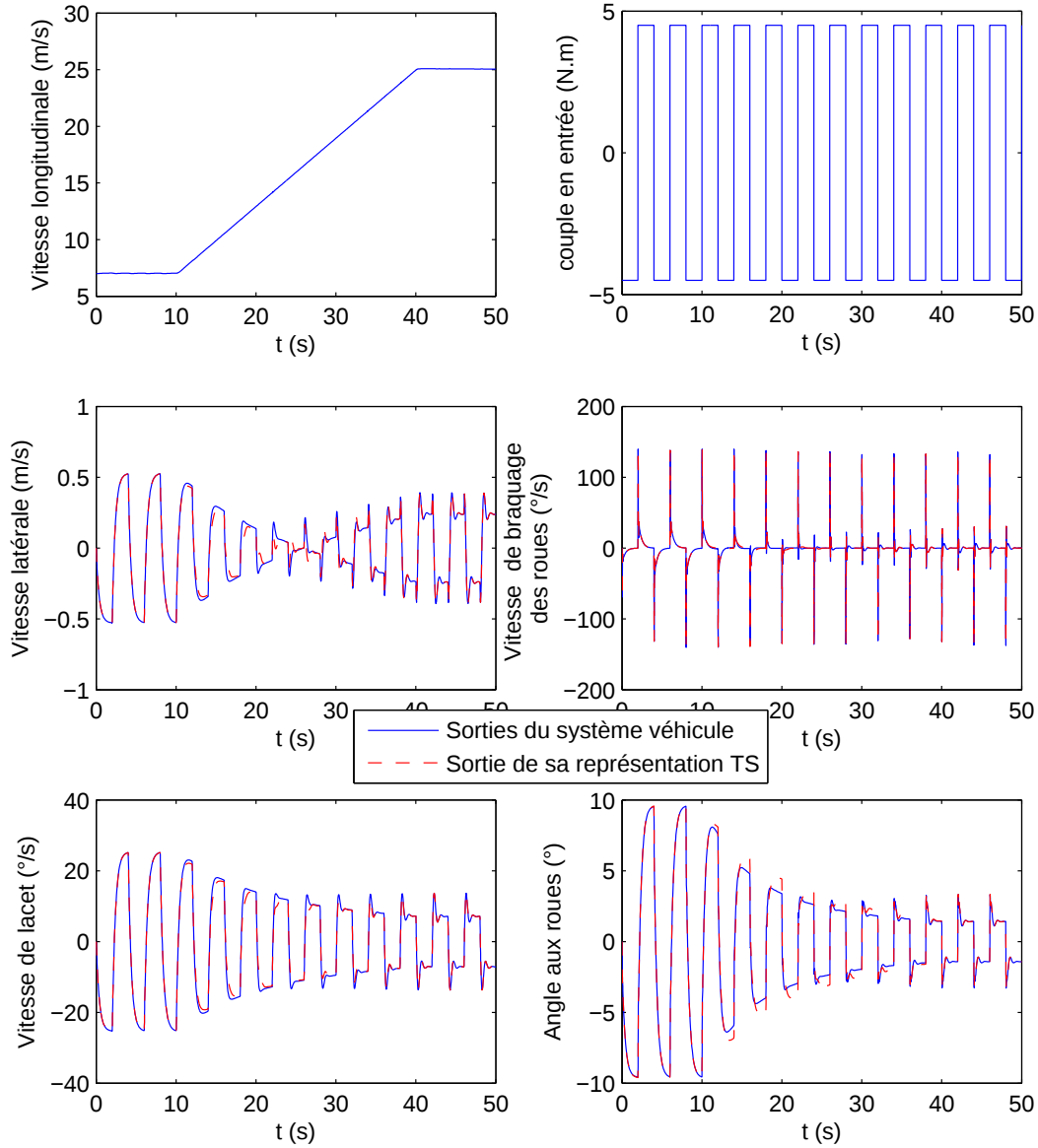


FIGURE 4.2 – Comparaison des sorties du modèle véhicule (4.15) à celles de sa représentation TS (4.16).

à celles du modèle du véhicule initial (4.15) sur les extrémités de l'intervalle de la vitesse longitudinale considérée, et une légère erreur apparaît entre les deux extrémités comme fait apparaître la figure 4.3.

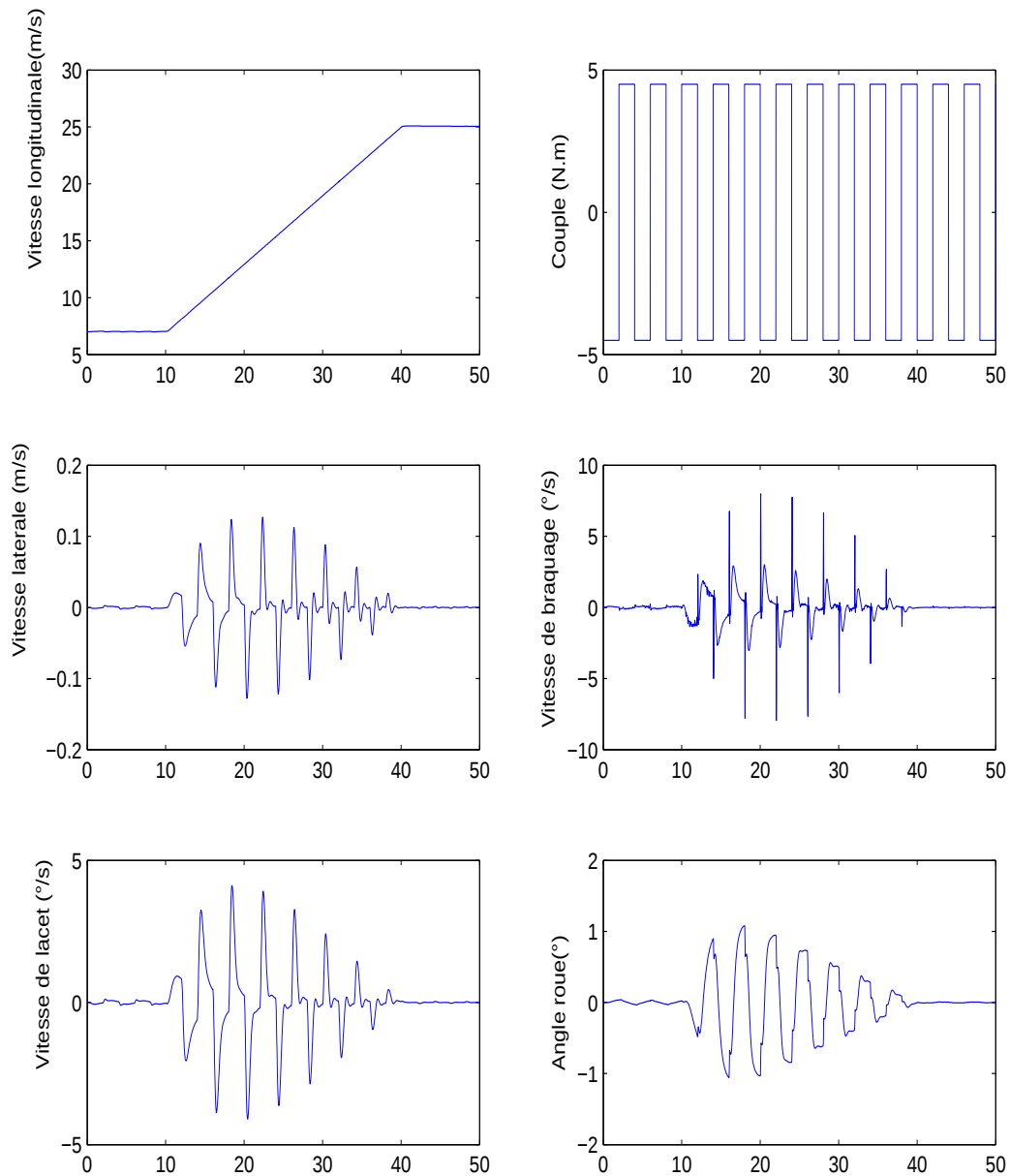


FIGURE 4.3 – Erreur d'approximation du modèle véhicule (4.15) par sa représentation TS (4.16).

4.3.1.2 Validation sur des données collectées sur SHERPA

La procédure de validation du modèle TS sur le simulateur SHERPA-LAMIH est la même que celle de la validation du modèle véhicule abordée en chapitre précédent §3.7, avec comme entrées au modèle la vitesse longitudinale du véhicule et le couple du conducteur mesuré.

Les résultats de la validation sont rapportés sur la figure 4.5.

Comme on peut le constater, là aussi, le modèle TS reproduit une bonne approximation de la dynamique du modèle de véhicule utilisé sur le simulateur SHERPA-LAMIH (modèle ARHMM).

Dans la suite le modèle validé sera utilisé pour la synthèse d'un contrôleur TS pour le maintien

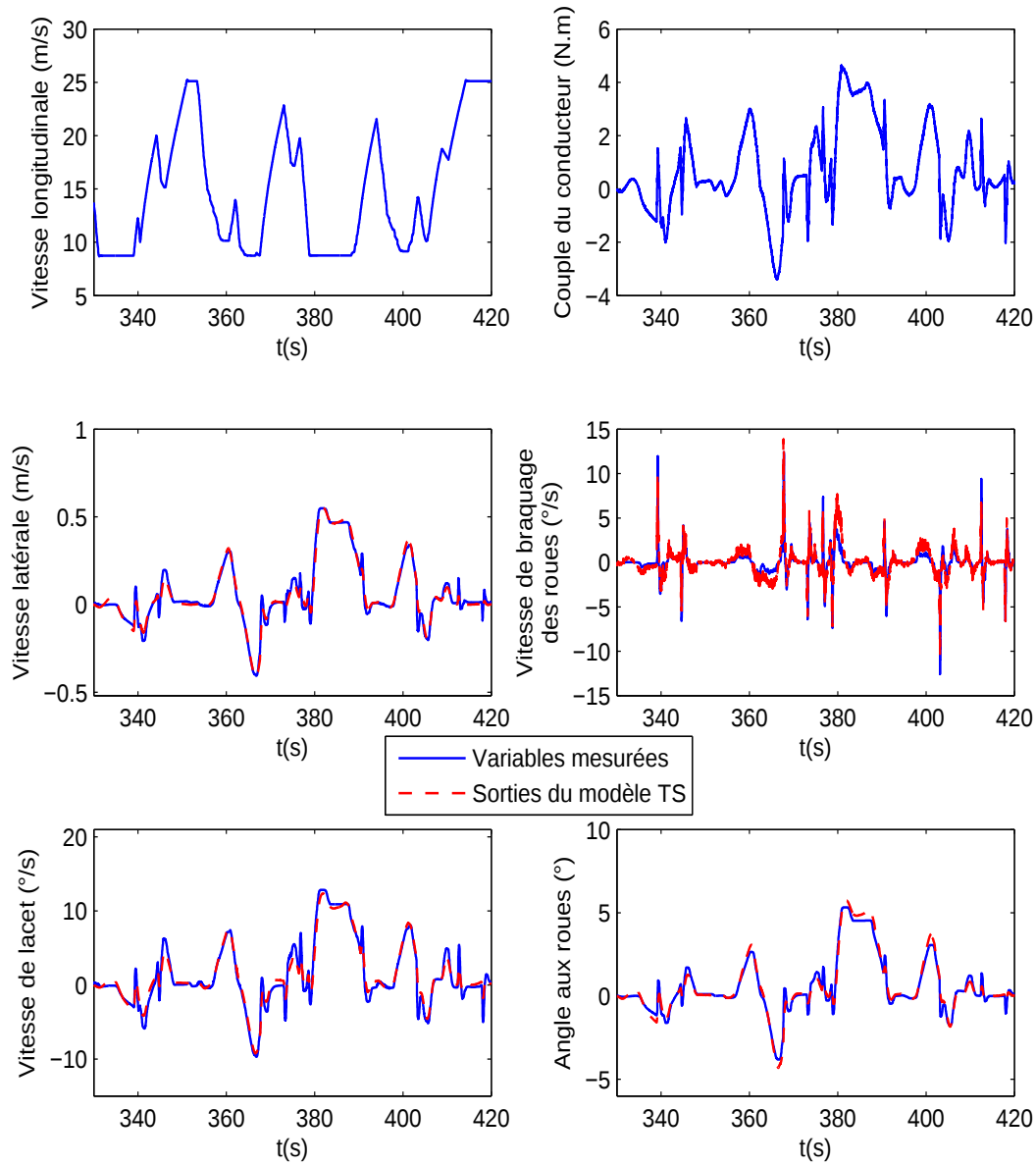


FIGURE 4.4 – Comparaison des sorties du modèle TS considéré (4.16) aux données collectées sur le simulateur

de voie.

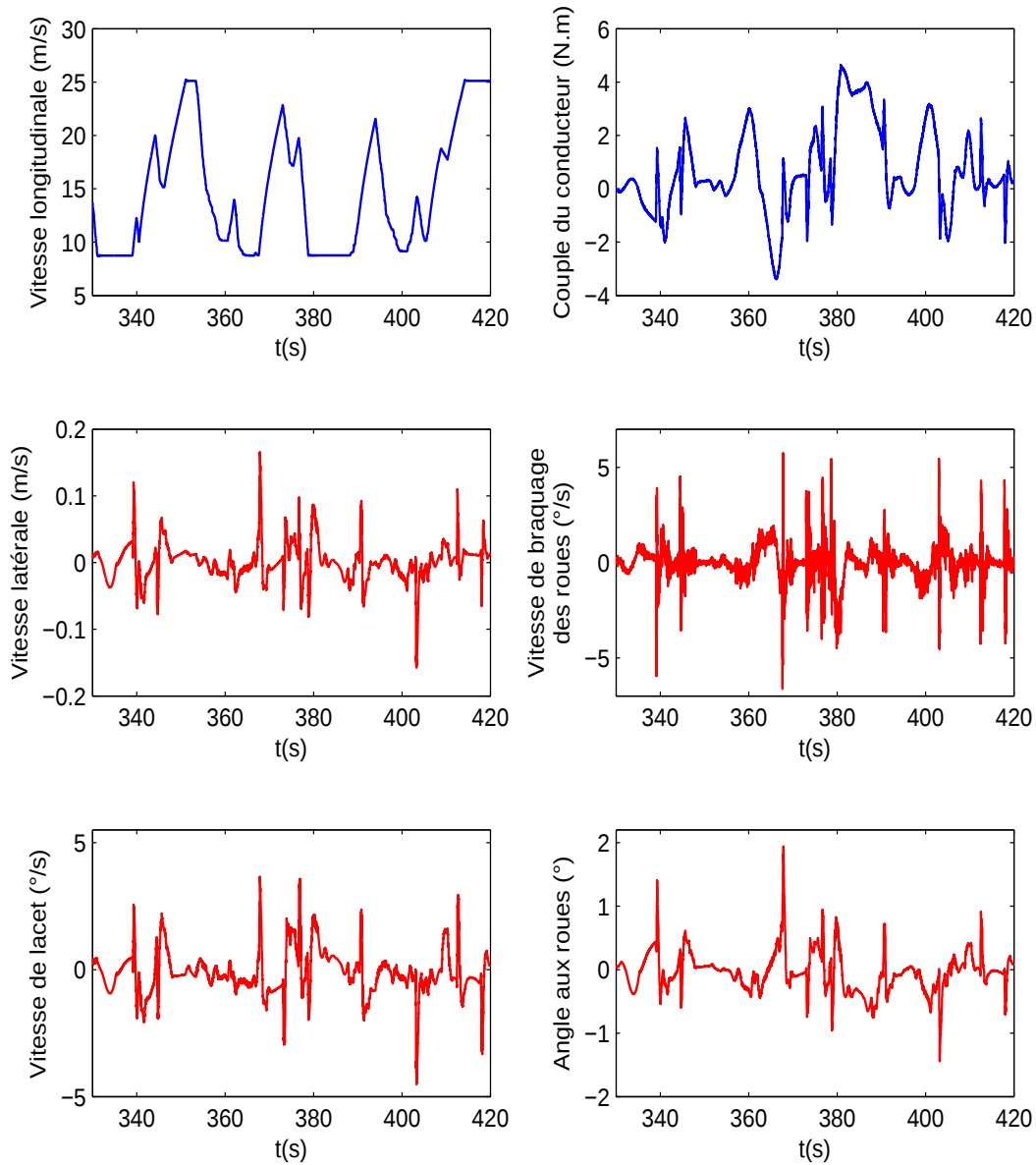


FIGURE 4.5 – Erreur d'approximation du modèle ARHMM du simulateur de conduite SHERPA-LAMIH par la représentation TS (4.16)

4.4 Stabilité et stabilisation d'un modèle TS

4.4.1 Stabilité d'un modèle TS

Comme déjà discuté dans la section précédente, la représentation ou modèle TS est une somme convexe de sous-systèmes linéaires. Le fait que tous les sous-systèmes soient stables n'est

pas une condition suffisante pour garantir la stabilité du système global [130].

Comme déjà évoqué, la stabilité d'un modèle TS est généralement étudiée par la méthode de Lyapunov [114]. La première étape dans l'étude de la stabilité avec cette méthode est le choix d'une fonction de Lyapunov $V(x)$ satisfaisant les conditions suivantes :

- $V(x) = 0 \implies x = 0$
- $V(x)$ est définie positive : $V(x) > 0, x \neq 0$
- $\|x\| \rightarrow \infty \implies V(x) \rightarrow \infty$

Soit le système autonome TS suivant :

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i A_i x \quad (4.17)$$

La condition de stabilité du système (4.17) découle directement du théorème de Lyapunov et est donnée par le théorème suivant :

Théorème 4.1 *Le modèle TS décrit par (4.17) est globalement asymptotiquement stable s'il existe une matrice symétrique définie positive commune P ($P = P^T > 0$) telle que :*

$$A_i^T P + P A_i < 0, \forall i \in [1, r] \quad (4.18)$$

Démonstration : Soit la fonction de Lyapunov,

$$V(x) = x^T P x ; P > 0 \quad (4.19)$$

D'après le théorème de Lyapunov, le système auquel est associé la fonction $V(x)$ converge asymptotiquement vers 0 si : Pour $V(x) > 0$ (ce qui est garanti puisque $P > 0$ et (4.18) est une forme quadratique)

$$\dot{V}(x) < 0 \quad (4.20)$$

On a :

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= x^T \left(\sum_{i=1}^r h_i A_i^T \right) P x + x^T P \left(\sum_{i=1}^r h_i A_i \right) x \\ &= x^T \sum_{i=1}^r h_i (A_i^T P + P A_i) x \end{aligned} \quad (4.21)$$

Donc (4.20) est valide si et si seulement si :

$$\sum_{i=1}^r h_i (A_i^T P + P A_i) < 0 \quad (4.22)$$

et d'après le lemme 4.3 on retrouve la condition (4.18).

4.4.2 Stabilisation d'un modèle TS

Soit le modèle TS (4.2), une loi de commande naturelle pour un tel système est proposée dans [143] : la PDC (Parallel Distributed Compensation) partageant les même règles des prémisses du modèle TS initial de la forme :

Regle_i : Si $\rho_1(t)$ est M_{i1} ... ET ρ_l est M_{il} Alors :

$$u(t) = K_i x(t) \quad (4.23)$$

Le signal de commande en chaque instant est :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i K_i x(t) \quad (4.24)$$

Où les h_i sont les mêmes que celles de (4.2).

La boucle fermée du système TS (4.2) avec la loi de commande (4.24) donne :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (A_i + B_i K_j) x(t) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i C_i x(t) \end{cases} \quad (4.25)$$

Pour assurer la stabilité du système en boucle fermée (4.25), on procède de la même manière que dans le cas du système autonome (4.17) avec cette fois-ci des matrices dynamiques $G_{ij} = A_i + B_i K_j$.

Soit la fonction de Lyapunov $V(x) = x^T P x$, la stabilité du système (4.25) revient à trouver les gains K_i , $i = 1..r$ et une matrice $P > 0$ tel que :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (G_{ij}^T P + P G_{ij}) < 0 \quad (4.26)$$

Le problème ainsi posé est non-linéaire en P et K_i , il faut faire un premier changement de variable $X = P^{-1}$ puis introduire les variables intermédiaires $N_i = K_i X$ pour convertir le problème (4.26) en des contraintes LMI convexes comme suit. En multipliant à gauche et à droite les inégalités (4.26) par X , on obtient :

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (X A_i^T + N_j^T B_i^T + A_i X + B_i N_j) < 0, \quad (4.27)$$

En définissant :

$$\Upsilon_{ij} = X A_i^T + N_j^T B_i^T + A_i X + B_i N_j \quad (4.28)$$

Et en exploitant le résultat du lemme 4.4, la stabilité du système (4.25) est donnée par le théorème suivant.

Théorème 4.2 [130] *Le modèle TS (4.2) avec la loi de commande (4.24) est globalement asymptotiquement stable, s'il existe une matrice $X > 0$ et les matrices N_i tel que (4.14) est vérifiée. Dans ce cas, les gains de la PDC (4.24) sont donnés par $K_i = N_i X^{-1}$.*

4.4.3 Problème de régulation

Considérant le modèle TS (4.31) d'un système non-linéaire affecté par une perturbation bornée $w(t)$ tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i (A_i x(t) + B_i u(t) + B_{wi} w(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i C_i x(t) \end{cases} \quad (4.29)$$

Nous cherchons un contrôleur TS de type (4.24), permettant de minimiser le critère quadratique :

$$J = \int_0^{\infty} z^T(t) Q z(t) + u^T(t) R u(t) dt \quad (4.30)$$

Tel que $z(t) = \sum_{i=1}^r h_i C_{zi} x(t)$ est le vecteur de performance, $Q > 0$ et $R > 0$ sont les matrices de pondération de dimensions appropriées.

La boucle fermée du système (4.29) avec la loi de commande (4.24) s'écrit alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (A_i + B_i K_j) x(t) + \sum_{i=1}^r h_i B_{wi} w(t) \\ \quad = \sum_{i=1}^r h_i^2 (G_{ii} x(t) + B_{wi} w(t)) + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i h_j ((G_{ij} + G_{ji}) x(t) + (B_{wi} + B_{wj}) w(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i C_i x(t) \end{cases} \quad (4.31)$$

Le théorème suivant donne les conditions d'existence du contrôleur TS (4.24) minimisant le critère (4.30) et permettant une atténuation de la perturbation d'un facteur λ .

Théorème 4.3 [138] *Le système (4.31) est stable et $x^T(0)Px(0) + \lambda^2 \|w(t)\|_2^2$ est la borne supérieure du critère (4.30), s'il existe une matrice $P > 0$ et les gains K_i satisfaisant les inégalités suivantes :*

$$\begin{aligned} G_{ii}^T P + P G_{ii} + C_{zi}^T Q C_{zi} + K_i^T R K_i + \frac{1}{\lambda^2} P B_{wi} B_{wi}^T P &< 0 \\ (G_{ij} + G_{ji})^T P + P (G_{ij} + G_{ji}) + C_{zi}^T Q C_{zj} + C_{zj}^T Q C_{zi} + K_i^T R K_j + K_j^T R K_i \\ + \frac{1}{2\lambda^2} P (B_{wi} + B_{wj})(B_{wi} + B_{wj})^T P &< 0 \end{aligned} \quad (4.32)$$

pour $i = 1..r$ et $j = i + 1..r$

Dans la suite, pour la lisibilité dans la démonstration on notera x en remplacement de $x(t)$ et w à la place de $w(t)$

Démonstration Soit la fonction de Lyapunov $V(t) = x^T P x$ avec $P = P^T > 0$, par dérivation on obtient :

$$\dot{V}(t) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (4.33)$$

En remplaçant $\dot{x}$ par son expression du système en boucle fermée

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i^2 x^T (G_{ii}^T P + P G_{ii}) x + \sum_{i=1}^r h_i^2 2x^T P B_{wi} w \\ & + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i h_j x^T ((G_{ij} + G_{ji})^T P + P(G_{ij} + G_{ji})) x \\ & + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i h_j 2x^T P (B_{wi} + B_{wj}) w \end{aligned} \quad (4.34)$$

En considérant la propriété matricielle suivante :

$$\begin{aligned} 2x^T P B_{wi} w(t) & \leq \frac{1}{\lambda^2} x^T P B_{wi} B_{wi}^T P x + \lambda^2 w(t)^T w(t) \\ 2x^T P (B_{wi} + B_{wj}) w(t) & \leq \frac{1}{2\lambda^2} x^T P (B_{wi} + B_{wj}) (B_{wi} + B_{wj})^T P x + 2\lambda^2 w(t)^T w(t) \end{aligned} \quad (4.35)$$

Et en remplaçant dans (4.34) :

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^r h_i^2 x^T (G_{ii}^T P + P G_{ii} + \frac{1}{\lambda^2} P B_{wi} B_{wi}^T P) x + \lambda^2 w(t)^T w(t) \\ & + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i h_j x^T ((G_{ij} + G_{ji})^T P + P(G_{ij} + G_{ji})) x \\ & + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i \frac{1}{2\lambda^2} x^T P (B_{wi} + B_{wj}) (B_{wi} + B_{wj})^T P x + 2\lambda^2 w^T w \end{aligned} \quad (4.36)$$

Si les conditions (4.32) sont vérifiées alors :

$$\dot{V}(t) \leq -x^T \left(\sum_{i=1}^r h_i^2 (C_{zi}^T Q C_{zi} + K_i^T R K_i) \right) x + \lambda^2 w^T w - \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} & x^T \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r h_i h_j (C_{zi}^T Q C_{zj} + C_{zj}^T Q C_{zi} + K_i^T R K_j + K_j^T R K_i) \right) x \\ & \Rightarrow \dot{V}(t) < -(z^T Q z + u^T R u) + \lambda^2 w^T w \end{aligned} \quad (4.38)$$

En intégrant cette inégalité de 0 à ∞ on retrouve

$$J \leq V(0) + \lambda^2 \|w\|_2^2 = x(0)^T P x(0) + \lambda^2 \|w\|_2^2 \quad (4.39)$$

Pour minimiser cette borne, on ajoute une autre contrainte qui est minimiser γ telle que :

$$x(0)^T P x(0) < \gamma. \quad (4.40)$$

La recherche des gains K_i se fait en transcrivant les conditions (4.32) et (4.40) en des LMIs et en recherchant γ minimale.

On procède comme dans le cas de la stabilisation en faisant le changement de variable $X = P^{-1}$ et en multipliant à gauche et à droite par X les inégalités (4.32) et en notant $N_i = K_i X$, on obtient :

$$\begin{aligned} \Upsilon_{ii} + XC_{zi}^T QC_{zi} X + N_i^T R N_i + \frac{1}{\lambda^2} B_{wi} B_{wi}^T &< 0 \\ \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} + X(C_{zi}^T QC_{zj} + C_{zj}^T QC_{zi})X + \\ N_i^T R N_j + N_j^T R N_i + \frac{1}{2\lambda^2} (B_{wi} + B_{wj})(B_{wi} + B_{wj})^T &< 0 \end{aligned} \quad (4.41)$$

Où Υ_{ij} est définie en (4.28).

En utilisant le complément de Schur (4.9) on trouve :

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_{ii} & XC_{zi}^T & N_i^T & B_{wi} \\ C_{zi}X & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ N_i & 0 & -R^{-1} & 0 \\ B_{wi}^T & 0 & 0 & -\lambda^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.42)$$

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_{ij} + \Upsilon_{ji} & XC_{zi}^T & XC_{zj}^T & N_i^T & N_j^T & B_{wi} + B_{wj} \\ C_{zi}X & -Q^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{zj}X & 0 & -Q^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ N_i & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 & 0 \\ N_j & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 \\ (B_{wi} + B_{wj})^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\lambda^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.43)$$

Pour $i = 1..r$ et $j = i + 1..r$

En appliquant le complément de Schur, la contrainte $x(0)^T P x(0) < \gamma$ peut se réécrire :

$$\begin{bmatrix} \gamma & x(0)^T \\ x(0) & X \end{bmatrix} > 0 \quad (4.44)$$

La recherche des gains K_i est donnée par le théorème suivant.

Théorème 4.4 *Pour un état initial $x(0)$ quelconque et un λ donnée, les gains K_i de la loi de commande (4.24) permettant de minimiser le critère (4.30) sont donnés par la résolution des LMIs (4.42), (4.43) et minimiser γ tel que (4.44).*

Si le problème est faisable, les gains K_i sont calculables par :

$$K_i = N_i X^{-1} \quad (4.45)$$

Corollaire 4.1 *Dans le cas où les matrices d'entrée du système sont constantes (4.5), c.-à.-d., $B_i = B$ et $B_{wi} = B_w \forall i$, ainsi que les matrices de sortie, $C_i = C \forall i$, les conditions d'existence du contrôleur (4.24) deviennent :*

Pour λ donnée, minimiser γ tel que :

$$\begin{bmatrix} \gamma & x(0)^T \\ x(0) & X \end{bmatrix} > 0 \quad (4.46)$$

et pour $i = 1..r$

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_{ii} & XC_z^T & N_i^T & B_w \\ C_z X & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ N_i & 0 & -R^{-1} & 0 \\ B_w^T & 0 & 0 & -\lambda^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.47)$$

Le paramètre λ est à choisir de telle sorte que le problème soit faisable.

4.5 Commande TS pour un maintien de voie

Dans cette partie nous exposons une commande pour le maintien de voie d'un véhicule automobile avec comme objectifs du contrôleur : maintenir le véhicule au centre de la voie, ce qui se traduit par :

- Minimiser l'erreur de cap (ψ_L) du véhicule pour assurer une bonne performance de suivi de voie.
- Minimiser l'écart latéral à l'avant du véhicule (y_L) pour assurer une bonne anticipation.
- Minimiser la vitesse de braquage pour garantir un confort de conduite (amélioration du damping).
- Minimiser le signal de commande (T_c couple de braquage) pour éviter la saturation et l'échauffement du moteur du système de direction.

Ce qui donne un vecteur de performance $z = (\psi_L, y_L, \dot{\delta})^T$ donc :

$$C_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Et le critère à minimiser :

$$J = \int_0^{\infty} z^T Q z + T_c R T_c dt \quad (4.48)$$

Avec $Q = \text{diag}(q_{\psi_L}, q_{y_L}, q_{\dot{\delta}})$ la matrice des pondérations sur les variables du vecteur de performance et R la pondération sur le signal de commande.

Comme la matrice d'entrée B du modèle TS du véhicule (4.16) et la matrice de sortie du vecteur de performance C_z sont constantes, le contrôleur est obtenu en appliquant le résultat du corollaire 4.1.

Pour la résolution des contraintes LMI nous avons utilisé, dans ce travail, la Toolbox YALMIP avec le solveur SeDuMi.

Les résultats de simulation obtenus pour une conduite automatique réalisée par contrôleur dans les premiers virages de la piste de test de Satory sont rapportés sur la figure 4.6 pour $x_0 = [1\text{m/s}, 1^\circ/\text{s}, 5^\circ, 0.5\text{m}, 2^\circ, 10^\circ/\text{s}]^T$ et les pondérations $Q = \text{diag}(15, 18, 2)$ et $R = 1$.

Comme on peut le constater, les variations de la vitesse longitudinale du véhicule n'affectent nullement les performances du contrôleur proposé. Le contrôleur assure un bon maintien de voie

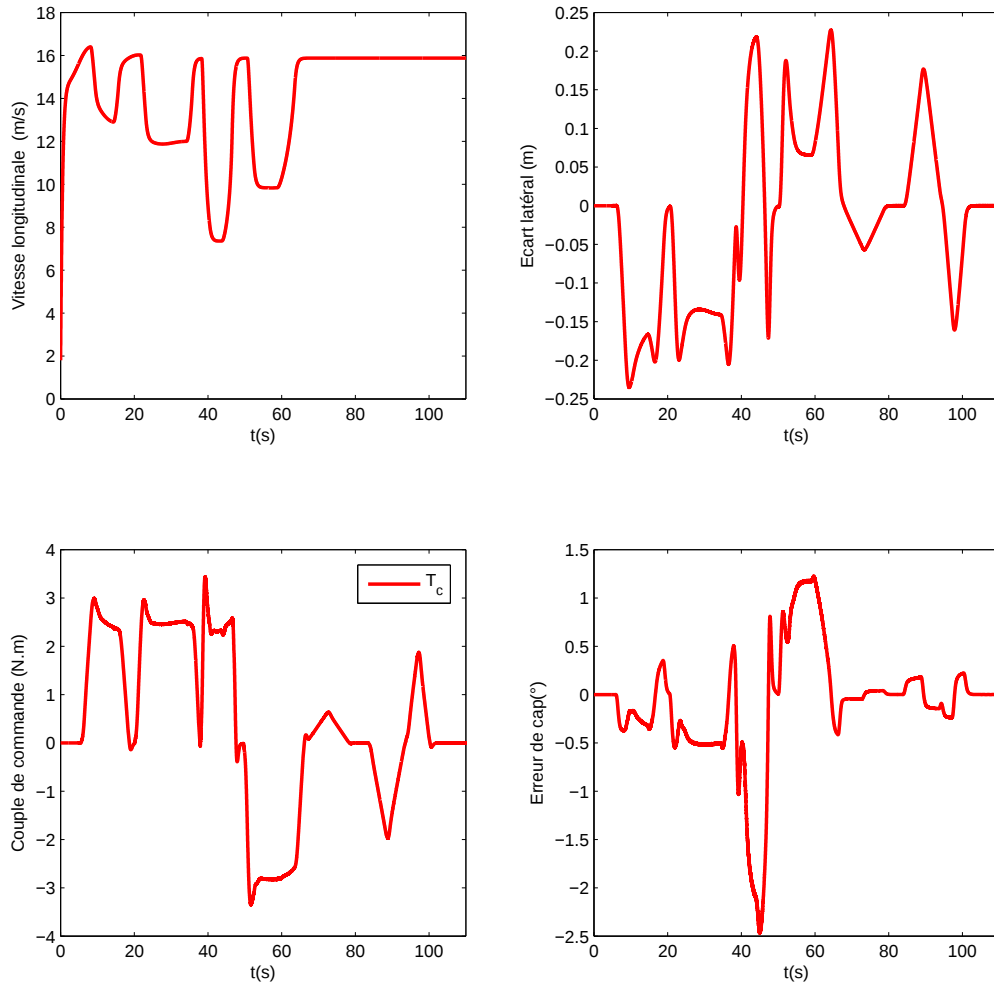


FIGURE 4.6 – Performances du contrôleur pour un maintien de voie en simulation numérique

en maintenant l'écart latéral en dessous $25cm$ (l'écart maximal est de $24.46cm$) et l'erreur de cap maximale est de 2.47° .

Le même constat est réalisé pour le test en conduite automatique sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH. Comme le rapporte la figure 4.7, l'écart latéral maximal est de $50cm$ réalisé au 4ème virage, puisque le véhicule survire. L'erreur de cap maximale est de 4.23° .

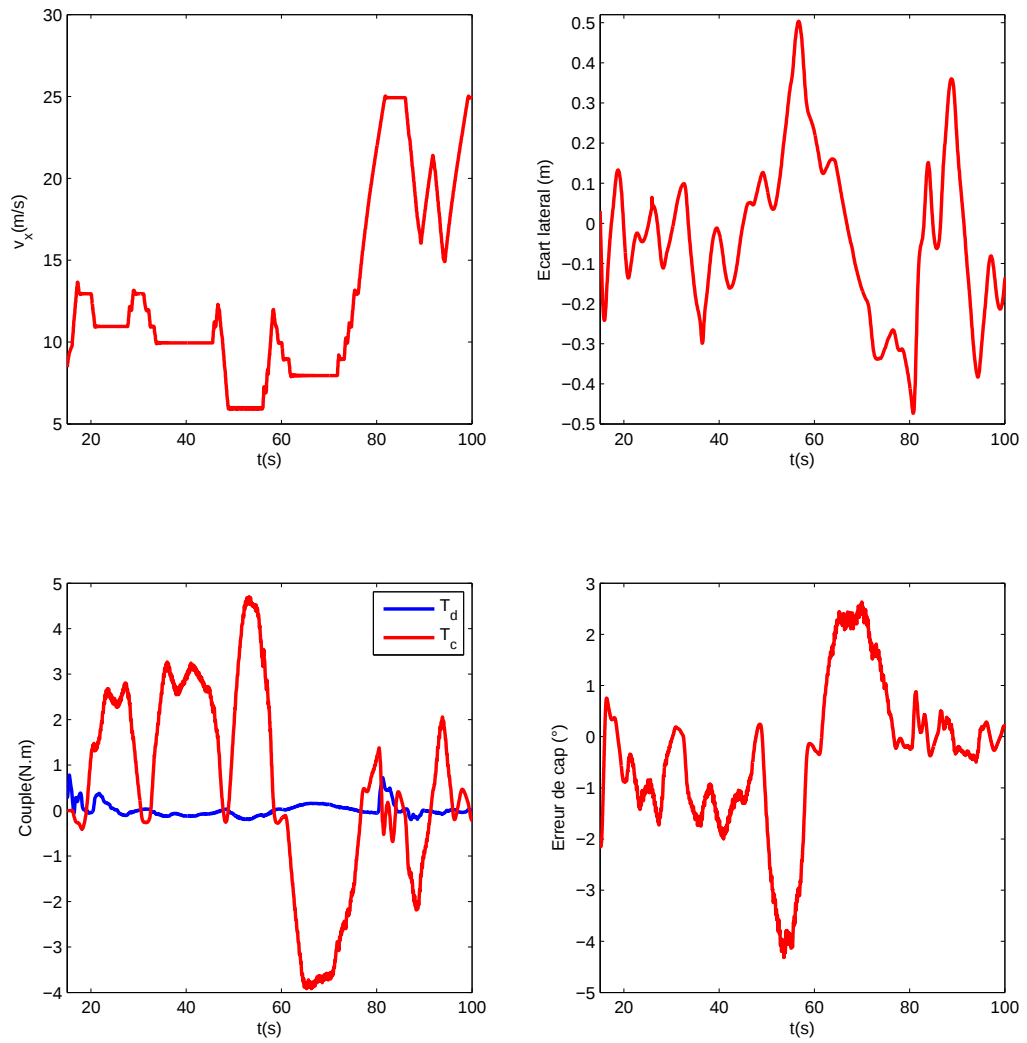


FIGURE 4.7 – Performances du contrôleur pour un maintien de voie obtenues sur le simulateur SHERPA

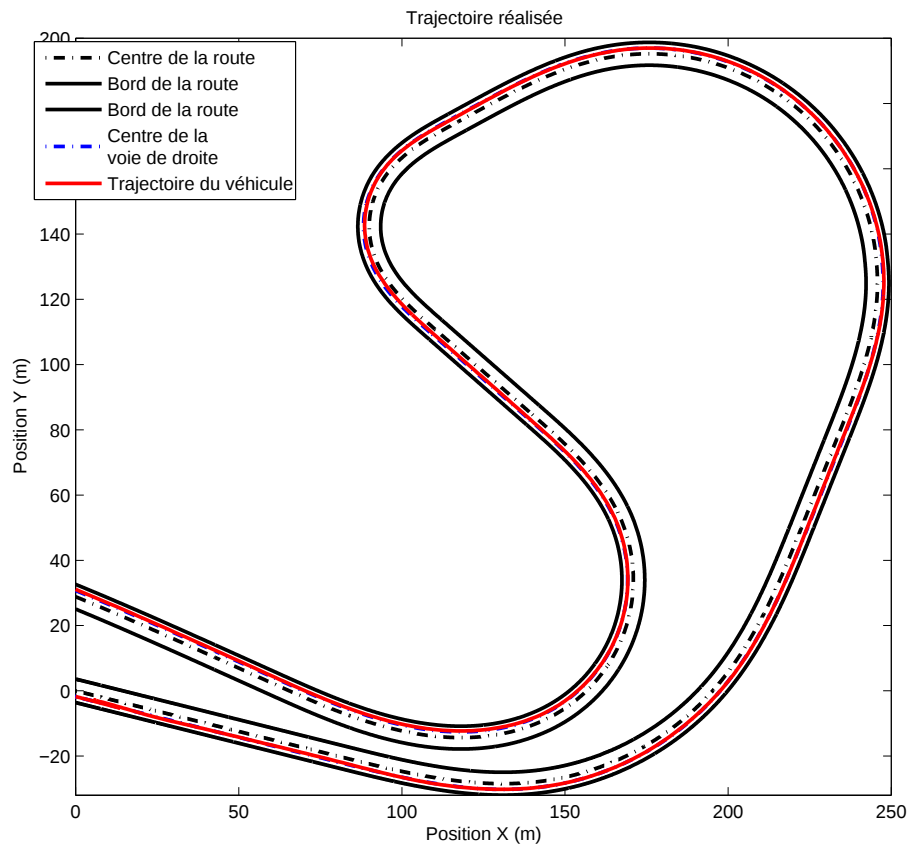


FIGURE 4.8 – Trajectoire réalisée par le contrôleur sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH

4.6 Robustesse du contrôleur

Pour appuyer notre choix d'utiliser un contrôleur TS en considérant la variation de la vitesse longitudinale du véhicule, nous avons comparé les performances du contrôleur TS à des contrôleurs Linéaires Quadratique optimaux obtenus pour des vitesses longitudinales constantes de valeurs respectives : 7m/s , 10m/s , et 16m/s pour les mêmes pondérations sur les variables de performances.

Les résultats sont rapportés sur la figure 4.9.

Comme on peut le constater, la variation de la vitesse affecte fortement les performances des

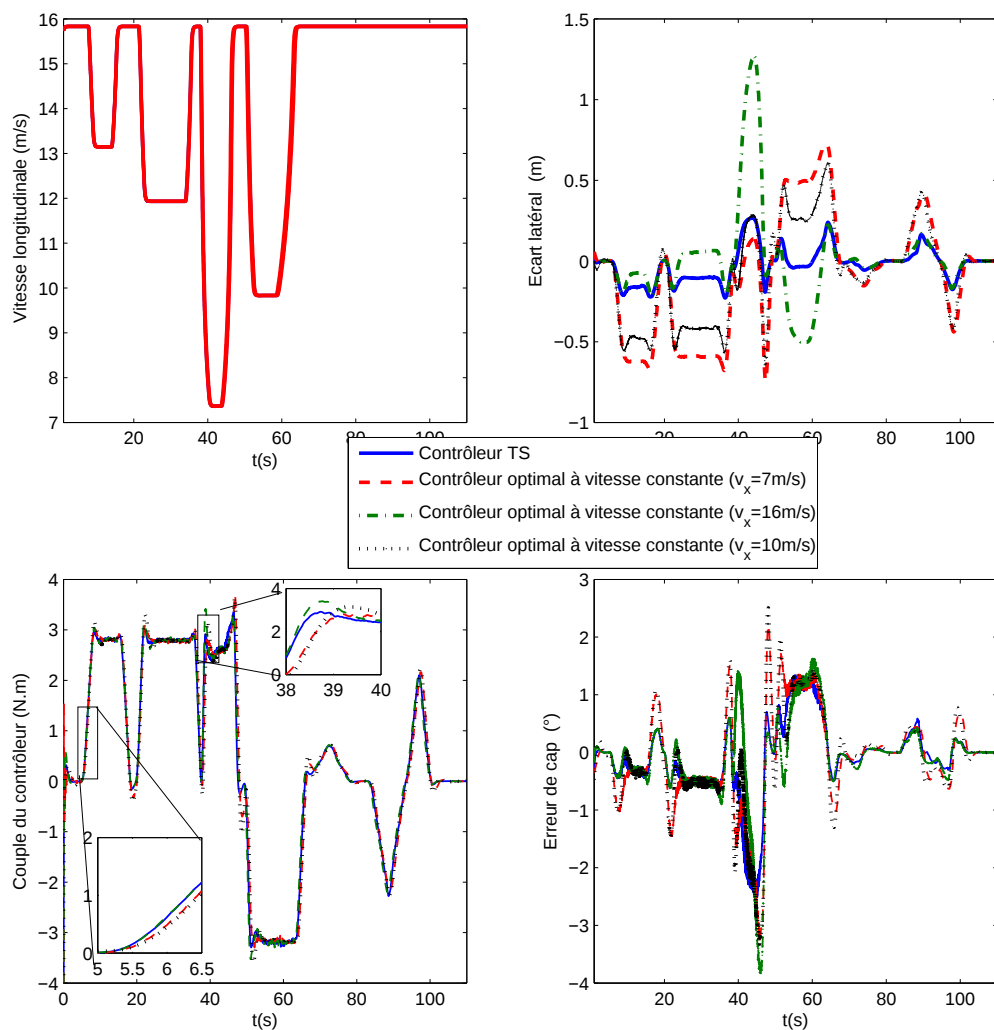


FIGURE 4.9 – Comparaison des performances du contrôleur TS proposé à celles des contrôleurs optimaux LQ obtenus pour une vitesse longitudinale constante ($v_x=7, 10$ et 16m/s)

contrôleurs optimaux mais pas celles du Contrôleur TS.

Le contrôleur obtenu considérant la vitesse à 16m/s à un comportement survireur tandis que les deux autres sous-virent contrairement au contrôleur TS proposé.

4.6.1 Rejet d'une perturbation

Afin de tester la robustesse du contrôleur vis-à-vis des perturbations externes, une simulation d'une rafale de vent latéral de 1100N d'une durée de 6s est rapportée sur la figure 4.10. Comme

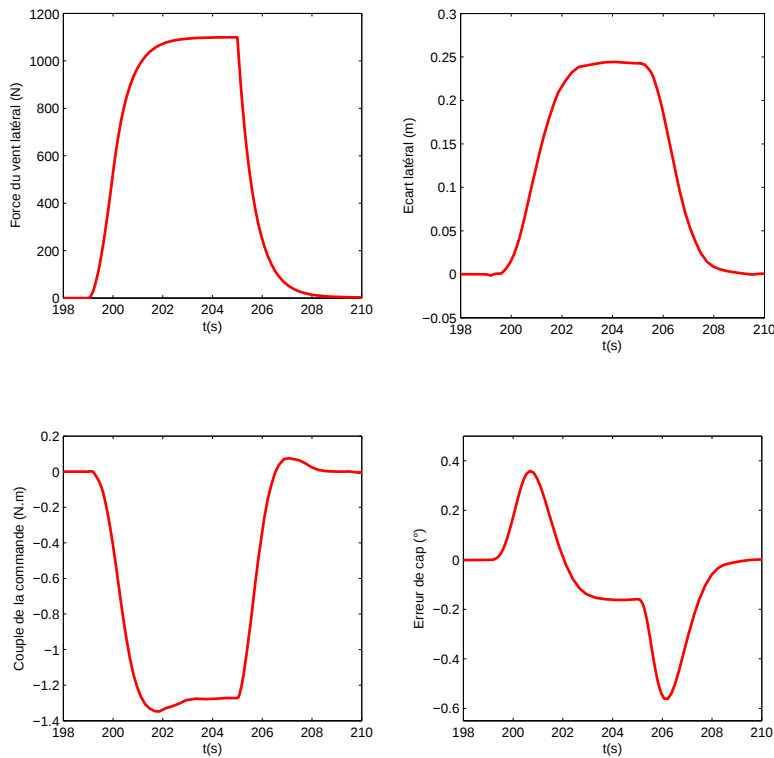


FIGURE 4.10 – Rejet d'une perturbation en rafale de vent latéral

on peut le constater le contrôleur réagit et rejette la perturbation : l'écart latéral maximal est de 24.5cm pour une erreur de cap maximale de 0.5°.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit la modélisation de type TS qui constituent un outil pour la représentation des systèmes non-linéaires, des systèmes variables dans le temps dans un espace compact des variables d'état sous la forme d'une somme pondérée de sous-systèmes linéaires (§4.2).

Cette représentation présente l'intérêt d'exploiter les techniques d'analyse de la stabilité et de

synthèse d'observateurs et de commandes développées pour les systèmes linéaires en les adaptant au contexte de la représentation TS.

Par la suite, la représentation TS du modèle véhicule développé dans le chapitre 3, est exposée (§4.3). Cette représentation est utilisée pour la synthèse d'un contrôleur TS pour le maintien de voie permettant de minimiser un critère de performance et assurer une robustesse par rapport aux perturbations externes (§4.5). En fin du chapitre le contrôleur est validé par des simulations numériques et interactives sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH. Un test de robustesse vis-à-vis des perturbations externes termine le chapitre.

Chapitre 5

Partage haptique de la conduite

Sommaire

5.1	Introduction	84
5.2	Conduite avec un contrôleur de maintien de voie : Problématique de partage	85
5.2.1	Scénarios de mise en situation	85
5.2.2	Résultats des simulations numériques	86
5.3	Partage haptique du contrôle latéral	87
5.3.1	Partage du contrôle par pondération	88
5.3.1.1	Validation en simulations numériques	89
5.3.2	Le partage comme l'un des objectifs du E-copilote	90
5.3.2.1	Modèle conducteur simplifié pour le suivi de voie	90
5.3.2.2	Synthèse du contrôleur intégrant le modèle conducteur	91
5.3.3	Validation de l'approche proposée en simulations numériques	96
5.4	Validations sur le simulateur de conduite SHERPA	97
5.4.1	Conduite avec E-copilote1	97
5.4.2	Conduite avec E-copilote1 pondéré : partage par pondération	97
5.4.3	Partage de conduite avec E-copilote2	98
5.5	Synthèse et discussion	101
5.5.1	Discussions des performances de maintien voie	102
5.5.2	Discussion sur "la qualité" du partage	104
5.6	Partage avec retour sur le Haut Niveau de Coopération (HNC)	107
5.6.1	Partage haptique avec retour sur le choix de la trajectoire	107
5.6.1.1	Simulations numériques	108
5.6.2	Simulation interactive avec retour sur le choix de la trajectoire	109
5.7	Conclusion	109

5.1 Introduction

Pourquoi parler de partage dans la conduite et pas de véhicule autonome ? Si la question est posée, c'est que à ce jour, même si les progrès techniques permettent de réaliser des pilotes électroniques (E-pilotes) pour des véhicules autonomes, garantir leur fiabilité hors des environnements qui leurs sont dédiés, n'est pas encore chose faite. La conduite automobile est une activité dans laquelle les conducteurs (humains ou automates) doivent faire face à une très grande variété de situations fortement dynamiques, qui peuvent être anticipées ou non. Ainsi, pour l'automatisation, même si plusieurs scénarios peuvent être étudiés dans leurs moindre détails, quoi qu'il arrive il y aura toujours des exceptions. Les systèmes proposés devront faire preuve de capacités d'adaptation qui sont, du moins pour l'instant encore, uniquement réalisables par l'être humain.

Sur un autre point, celui de la législation la question du véhicule autonome reste encore en débat. La circulation routière est, à ce jour, régie par la convention de Vienne de 1968 qui telle qu'elle est aujourd'hui, ne permet pas de mettre en circulation un véhicule autonome.

Comme on peut le lire dans l'article 8.5 [139] :

Art. 8 Conducteurs :

1. **Tout véhicule en mouvement ou tout ensemble de véhicules en mouvement doit avoir un conducteur.**
2. Il est recommandé que les législations nationales prévoient que les bêtes de charge, les bêtes de trait ou de selle et, sauf éventuellement dans les zones spécialement signalées à l'entrée, les bestiaux isolés ou en troupeaux doivent avoir un conducteur.
3. **Tout conducteur doit posséder les qualités physiques et psychiques nécessaires et être en état physique et mental de conduire**
4. Tout conducteur de véhicule à moteur doit avoir les connaissances et l'habileté nécessaires à la conduite du véhicule ; cette disposition ne fait pas obstacle, toutefois, à l'apprentissage de la conduite selon la législation nationale
5. **Tout conducteur doit constamment avoir le contrôle de son véhicule...**

Si ce texte ne permet pas la circulation de véhicules totalement autonomes (sans conducteur) il permet d'envisager un véhicule équipé d'un système d'assistance partageant la conduite (coopérant) avec le conducteur [141].

Pour atteindre cet objectif, une solution spécifique doit être développée. Dans un premier temps, nous démontrerons cette nécessité en illustrant par une simulation numérique les problèmes posés par le partage dans la conduite avec un contrôleur conçu pour le maintien de voie. Pour cela le conducteur est mis dans la boucle de conduite avec le contrôleur TS discuté dans le chapitre précédent. Dans un second temps nous présenterons deux stratégies que nous avons développées pour un partage efficace.

Avant, il est nécessaire de clarifier certaines notions utilisées dans la suite.

Remarque 5.1 *Dans ce travail nous considérons que :*

5.2. CONDUITE AVEC UN CONTRÔLEUR DE MAINTIEN DE VOIE : PROBLÉMATIQUE DE PARTAGE

- Le contrôle longitudinal est assuré par un contrôleur permettant de réaliser un bon suivi de la vitesse de consigne délivrée par le système de planification de trajectoire.
- Conduire le véhicule revient à le positionner sur une voie de circulation de la route en respectant les règles du code de la route.
- Éviter un obstacle c'est s'écarter du centre de la voie de circulation. Dans les simulations numériques cela est simulé par un double changement de voie.
- Un conflit entre le conducteur et le E-copilote se traduit par une opposition de leurs actions (couples de braquage).

5.2 Conduite avec un contrôleur de maintien de voie : Problématique de partage

Dans cette partie, le contrôle latéral du véhicule est assuré simultanément par un conducteur et le contrôleur développé dans le chapitre précédent (§4.5), que nous appellerons dans la suite du chapitre **"E-copilote1"**. En simulations numériques le modèle conducteur discuté dans la section 3.5 est utilisé pour simuler le partage du contrôle latéral du véhicule. En simulations interactives sur le simulateur SHERPA, un conducteur humain interagit avec le "E-copilote1" directement au niveau du volant.

Pour pouvoir conclure sur la qualité du partage du contrôle du véhicule en latéral, le paragraphe suivant décrit le scénario mettant les deux intervenants sur le contrôle du véhicule en accord puis en conflit.

5.2.1 Scénarios de mise en situation

Nous supposons être dans la configuration rapportée sur la figure 5.1 où le E-copilote ne dispose que d'une seule trajectoire (Traj1) qui est de suivre la voie courante de circulation (voie de droite), si on ignore la trajectoire d'arrêt d'urgence Traj0 (qui est l'arrêt du véhicule sur la voie courante).

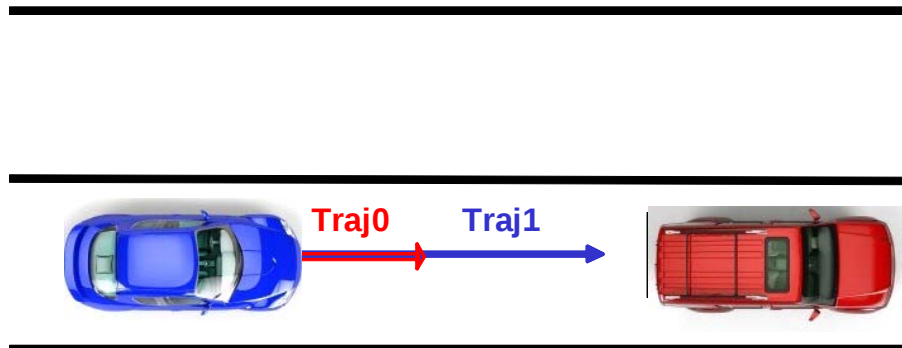


FIGURE 5.1 – Configuration pour une seule trajectoire disponible.

Le scénario que nous avons mis au point, se compose de deux phases : il débute par un suivi de

voie dans les premiers virages de la piste de Satory puis se poursuit par l'évitement d'un obstacle effectué par le conducteur, cet obstacle n'ayant pas été détecté par le E-copilote.

5.2.2 Résultats des simulations numériques

Les résultats de simulation sont rapportés sur la figure 5.2.

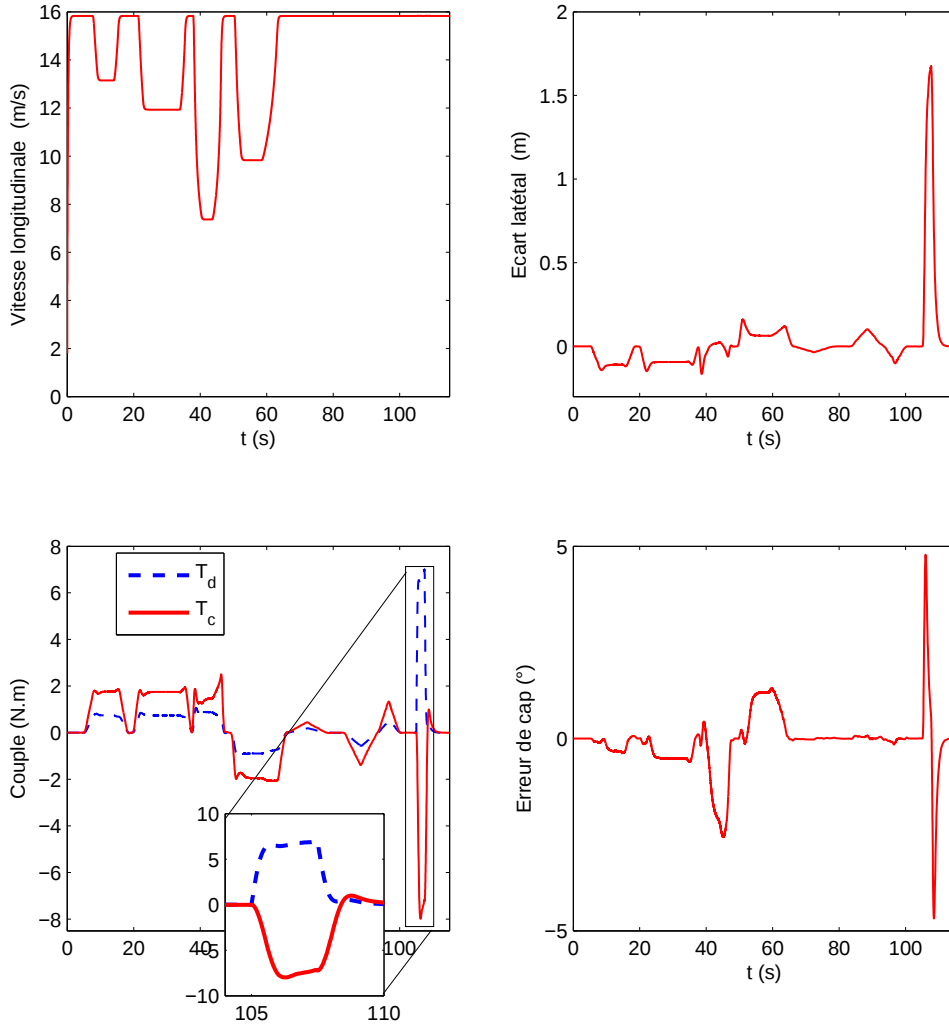


FIGURE 5.2 – Simulation d'un partage de la conduite entre le modèle conducteur et le contrôleur présentés dans le chapitre précédent pour une situation de suivi de voie puis d'évitement d'un obstacle.

Ces résultats sont tout à fait conformes aux attentes, à savoir, dans la première phase du scénario (suivi de voie), le E-copilote est en parfaite concordance avec le conducteur ; les couples des deux intervenants sont de même signe et évoluent avec la même dynamique. Les performances réalisées, en matière de maintien de voie, dépassent celles du E-copilote. On enregistre un écart

latéral maximal de 16.44cm au 3^{ème} virage.

Si l'on reste à ce premier constat, le E-copilote1 est d'un grand intérêt pour l'amélioration de la qualité du guidage et permettra d'éviter la sortie de route du véhicule. Le généraliser, permettrait de sauver de nombreuses vies (la part des sorties de voie est la cause de près de 4 décès sur sur 10, 38.5 %, [97]).

A l'instant $t = 105\text{s}$ la manœuvre d'évitement d'obstacle est initiée par le modèle conducteur, le E-copilote réagit immédiatement et s'oppose à lui pour garder le véhicule au centre de la voie de circulation, et ainsi garder les performances pour lesquelles il a été conçu. Durant cette tentative, le couple conducteur (T_d) atteint 7N.m mais malgré cet effort conséquent, le conducteur n'arrive à réaliser un déport latéral du véhicule que de 1.67m au maximum et ne réussit pas à atteindre la voie de gauche pour réaliser l'évitement. Sachant que plus d'une personne sur trois (37,7%) décède à la suite d'un accident contre un obstacle fixe [97], garder le E-copilote1 tel qu'il est avec un risque de se confronter à une situation telle que celle-ci est "dangereux".

C'est pour cette raison qu'il est primordial de considérer le conducteur dans la boucle de commande et de lui donner la possibilité de reprendre le contrôle du véhicule à tout moment. Dans ce travail nous considérons qu'un des moyens possibles, pour atteindre cet objectif, est de considérer le couple de braquage que le conducteur applique sur le volant.

Dans la suite deux architectures de partage du contrôle conçues pour remédier au problème de conflit en tenant compte du conducteur via son couple de braquage seront exposées. Dans la première, nous proposons une pondération sur le couple du E-copilote qui se fera en fonction du couple appliqué par le conducteur. Dans la seconde, le conducteur est pris en compte dans l'étape de la synthèse du contrôleur en intégrant un modèle conducteur au modèle véhicule-Route (V-R).

5.3 Partage haptique du contrôle latéral

Nous parlons de partage haptique, puisque c'est via les "échanges" de couples au niveau de la colonne de direction que se réalise le guidage latéral du véhicule. Le conducteur transforme ses **intentions** (qu'on suppose ne pas connaître) en des **actions** sur le volant. Le E-copilote fait de même. Comme notre marche consiste à élaborer une assistance au conducteur avec **la prise en compte des intentions du conducteur**, le but est de limiter les interférences négatives (**oppositions**) entre le conducteur et le E-copilote.

Dans le cas où l'intention du conducteur est différente de celle du E-copilote, il est essentiel que le E-copilote ne le contre pas dans son action et l'empêche de faire ce qu'il souhaite (un changement de voie, éviter un obstacle ou un trou dans la chaussée...). Néanmoins, cette situation suppose que le conducteur soit en " pleine possession de ses moyens ".

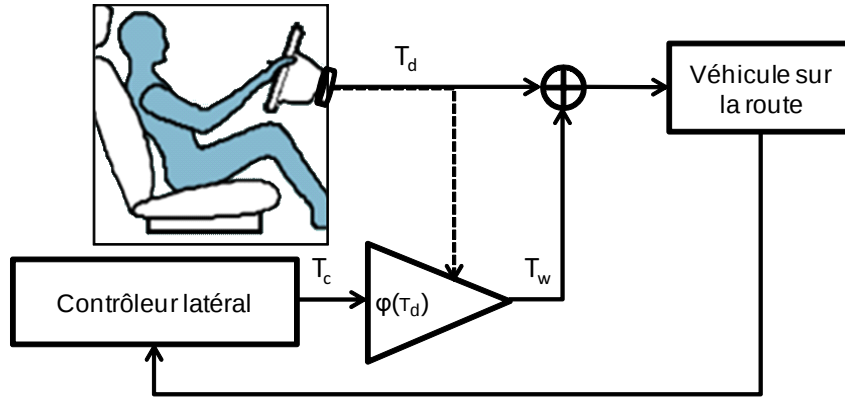


FIGURE 5.3 – Architecture de coopération avec pondération.

5.3.1 Partage du contrôle par pondération

L'idée de pondération d'action d'un contrôleur a été déjà proposée dans [15] où les auteurs utilisent l'angle de braquage comme signal de commande, ce qui n'est pas vraiment adapté pour un partage de conduite [124, 92]. Dans [79] l'auteur propose une pondération fixe sur le signal de commande d'un contrôleur élaboré initialement comme un système de maintien de voie, mais cette fois-ci, le signal de commande est le couple de braquage au lieu de l'angle. Dans [121] les auteurs proposent la même idée avec une pondération dynamique du signal du contrôleur en fonction du positionnement du véhicule sur la route et le couple du conducteur.

Dans notre cas, nous avons repris l'idée de pondération du couple de braquage du E-copilote1 et la figure 5.12 représente l'architecture de coopération avec pondération adoptée.

L'idée est de moduler le couple de braquage du E-copilote1 en fonction de celui du conducteur de manière continue. Pour un bon ressenti du conducteur, le choix s'est porté sur une fonction gaussienne permettant une pondération lisse et sans discontinuité, telle que :

$$T_w = T_c \underbrace{e^{\frac{-T_d^2}{\sigma^2}}}_{\varphi(T_d)} \quad (5.1)$$

Avec T_d , T_c et T_w qui sont, respectivement, le couple de braquage du conducteur, le couple du E-copilote1 avant et après pondération. σ est la largeur de la gaussienne qui peut être ajustée pour obtenir le ressenti désiré. En l'absence de couple conducteur, la totalité du couple du E-copilote1 est maintenu pour la commande ($T_w = T_c$) (voir la figure 5.4). Le E-copilote, dans ce cas, maintient le véhicule sur la voie de circulation indiquée par le module de planification de trajectoire avec ses performances optimales. On est, alors, dans un cas de véhicule autonome. Dès que le conducteur applique un couple de braquage, donc exprime sa volonté de faire autre chose que ce que fait le E-copilote ou uniquement veut imposer son style de conduite (façon d'aborder un virage par exemple), la commande est pondérée et le conducteur peut guider le véhicule avec plus de liberté tout en ressentant une certaine résistance lui permettant de savoir que le E-copilote est toujours actif.

Le choix du paramètre σ permet d'ajuster la résistance (impédance) du E-copilote aux actions

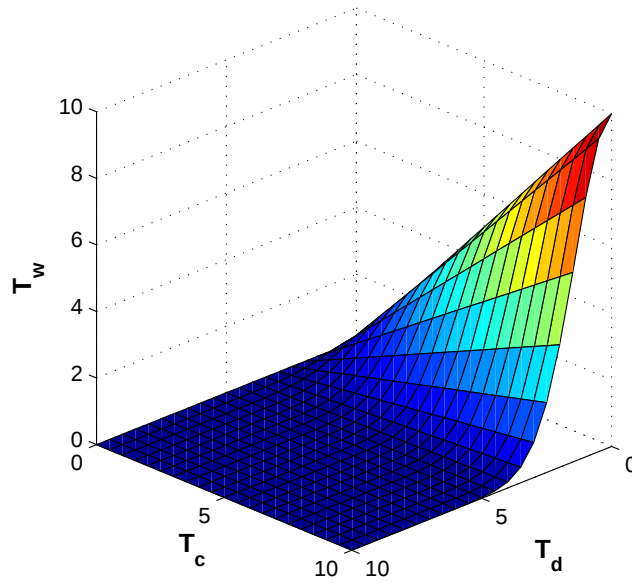


FIGURE 5.4 – Couple de commande pondéré en fonction du couple de la commande et de celui du conducteur

du conducteur, plus σ est élevé plus le conducteur ressent le couple du E-copilote.

5.3.1.1 Validation en simulations numériques

L'évaluation de cette approche a été faite sur le scénario décrit dans §5.2.1. La figure 5.5 rapporte le résultat des simulations numériques.

Lors de la phase de conduite pour un maintien de voie, les résultats sont similaires à ceux obtenus dans le cas où il n'y avait pas de pondération. Les couples de braquage du conducteur et du E-copilote sont de même signe et évoluent de façon similaire. L'écart latéral maximal enregistré est de 18.66cm , ce qui est un peu plus important que dans le cas sans pondération puisque ce n'est pas la totalité du couple de braquage du E-copilote qui est utilisée. En revanche, durant la manœuvre d'évitement d'obstacle, lorsque le conducteur applique un couple de braquage pour s'écarter du centre de la voie, la pondération fait que celui-ci n'est pas contraint par le E-copilote puisque son couple pondéré retombe à zéro : il réussit à réaliser la manœuvre d'évitement. On enregistre un couple de braquage maximal de 5.93N.m pour un écart maximal de 2.75m , ce qui représente un gain de plus d'un mètre d'écart latéral et une importante réduction de l'effort produit par le conducteur par rapport à la première stratégie.

Cette approche donne des résultats satisfaisants, par contre, elle se base sur la dégradation des performances d'un contrôleur initialement conçu pour un maintien de voie.

Dans la section qui suit nous exposerons une approche dans laquelle le conducteur est considéré dans la synthèse de la loi de commande.

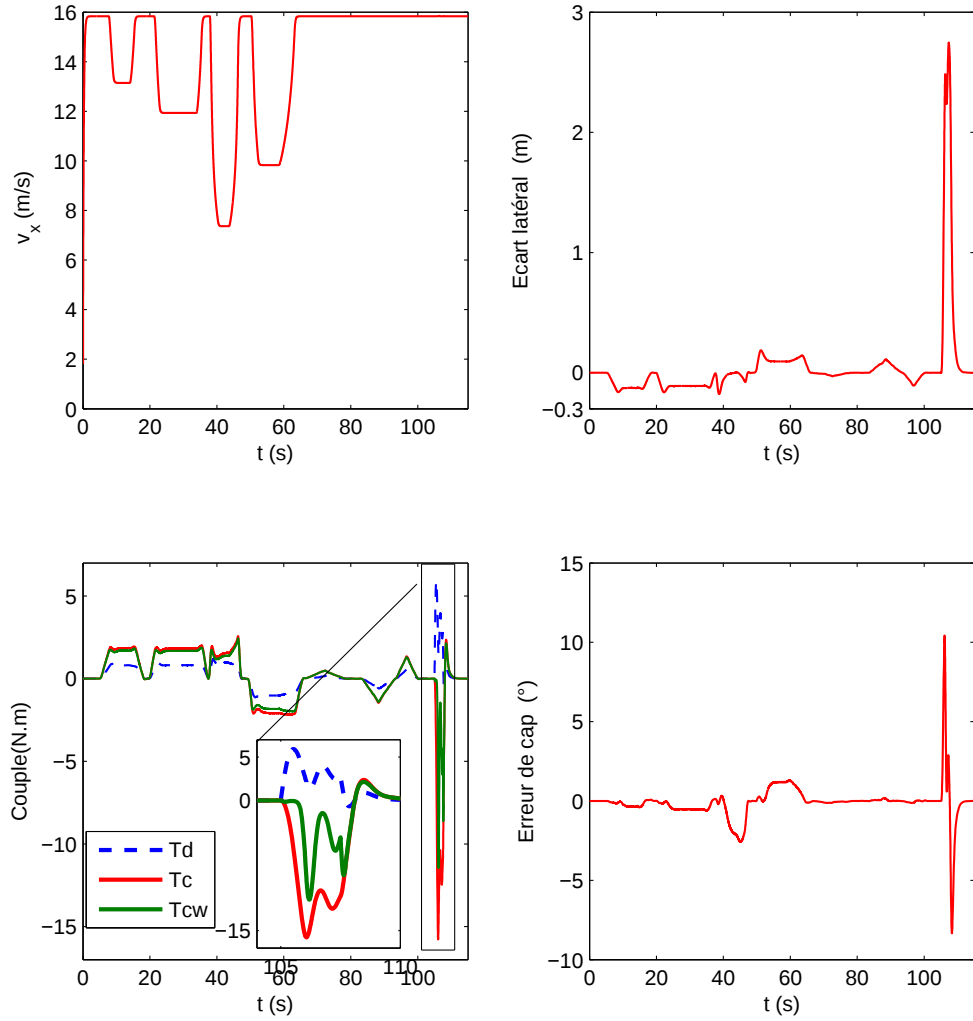


FIGURE 5.5 – Simulation numérique d’une conduite partagée avec pondération de l’action du E-copilote1.

5.3.2 Le partage comme l’un des objectifs du E-copilote

Contrairement à la démarche adoptée pour assurer le partage de conduite basée sur la pondération, dans ce qui suit, le partage de la conduite est intégré dans les objectifs du E-copilote. Pour cela, nous introduirons un modèle conducteur simplifié qui sera intégré au modèle véhicule-route (V-R) discuté dans le chapitre 3 (§3.4.3) pour la synthèse du contrôleur.

5.3.2.1 Modèle conducteur simplifié pour le suivi de voie

Dans ce travail, pour répondre au besoin d’étudier les interactions entre un E-copilote et un conducteur, nous avons utilisé le modèle conducteur discuté dans le chapitre 3 (§3.5). Néan-

moins, ce modèle étant trop complexe pour l'intégrer en vue de synthèse de lois de commande, nous l'avons simplifié en intégrant les aspects anticipatif et correctif. Cette simplification donne un modèle proportionnel à l'écart latéral à une distance d'anticipation du conducteur " l_d " : ($y_d = y_c + l_d\psi_L$) et à l'erreur de cap du véhicule (ψ_L) :

$$T_d = -k_1 y_d - k_2 \psi_L \quad (5.2)$$

Où y_c représente l'écart latéral du centre de gravité par rapport au centre de la voie.

La figure 5.6 rapporte les résultats de simulation d'un suivi de voie réalisé par le modèle conducteur simplifié sur les premiers virages de la piste de Satory.

On remarque que les performances réalisées par ce modèle sont moins bonnes que celles du contrôleur mais restent acceptables puisque le modèle reproduit bien le comportement de suivie de voie recherché.

La figure 5.7 rapporte les résultats de simulation d'une manœuvre d'évitement d'obstacle réalisée par le modèle conducteur proposé d'une part en simulation numérique et d'autre part par un conducteur humain dans le simulateur de conduite SHERPA. On peut remarquer que la manœuvre simulée reproduit d'une manière assez fidèle la manœuvre réalisée sur le simulateur SHERPA par un conducteur humain.

5.3.2.2 Synthèse du contrôleur intégrant le modèle conducteur

Vue la dynamique des deux variables y_L (qui est similaire à y_d) et ψ_L discutée dans le chapitre 3 (§3.4.1 Eq.(3.30)), la dynamique du couple du modèle conducteur devient :

$$\dot{T}_d = -k_1 v_y - (k_1 l_d + k_2) r - k_1 v_x \psi_L + k_2 v_x \kappa \quad (5.3)$$

En intégrant ce modèle au modèle V-R, le système augmenté conducteur-véhicule-route (C-V-R) s'écrit alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_{va} = A_a x_{va} + B_{ua} T_c + B_{wa} w \\ y_{va} = C_a x_{va} \end{cases} \quad (5.4)$$

Avec pour matrices dynamiques :

$$A_a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & l_s & v_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_{s1} & T_{s2} & 0 & 0 & T_{s3} & T_{s4} & \frac{1}{J_s} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B_{ua} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{wa} = \begin{pmatrix} e_1 & 0 \\ e_2 & 0 \\ 0 & -v_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_2 v_x \end{pmatrix}.$$

Tel que : $x_{va} = [x_v, T_d]^T$ est le nouveau vecteur d'état composé du vecteur d'état du véhicule (x_v) plus le couple conducteur (T_d). Les éléments des matrices A_a , B_{ua} et B_{wa} sont les mêmes que ceux du modèle V-R (3.34) avec en plus $a_{71} = -k_1$, $a_{72} = -(k_1 l_d + k_2)$, $a_{73} = -k_1 v_x$

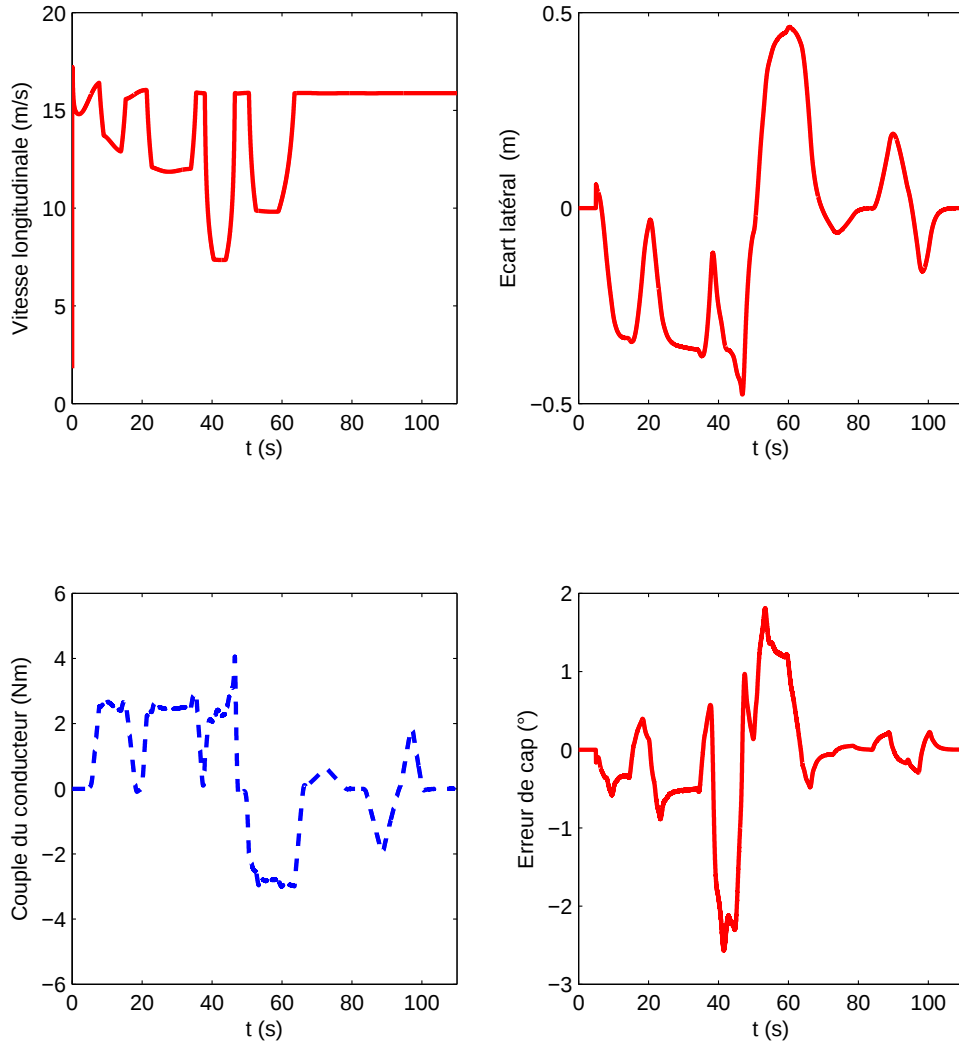


FIGURE 5.6 – Résultats de simulation de suivi de voie réalisé par le modèle conducteur simplifié (5.2).

Comme dans la cas du modèle V-R le modèle C-V-R est représenté par un modèle TS pour la synthèse d'un contrôleur (E-copilote2) considérant le conducteur dans la boucle. La figure 5.8 rapporte un comparaison des sorties du modèle C-V-R (5.4) à celles de sa représentation TS en réponse à une excitation d'un couple externe en signal carré d'une amplitude de $10N.m$ et d'une fréquence de $0.15Hz$.

L'intérêt d'intégrer un modèle conducteur au modèle V-R est, d'une part, de pouvoir inclure *à priori* des informations sur le style de conduite d'un conducteur humain (son temps d'anticipation, l_d) et d'autre part, de considérer le problème, du point de vue de l'automatique, avec

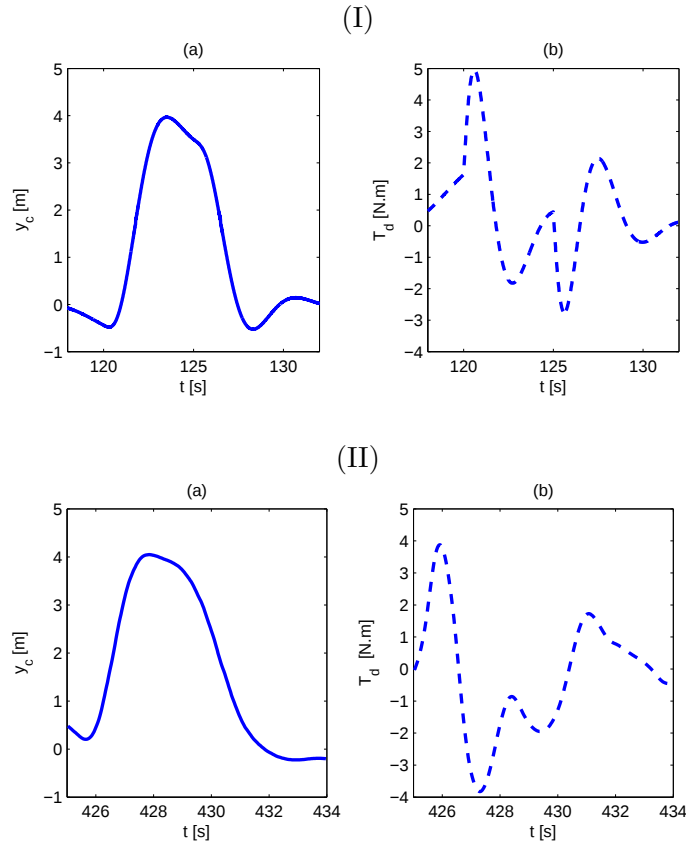


FIGURE 5.7 – Manœuvre d'évitement d'obstacle réalisée par : (I) Le modèle conducteur simplifié (5.2) en simulation numérique, (II) Un conducteur humain sur le simulateur SHERPA. (a) : Écart latéral (y_c), (b) : Couple de braquage du conducteur (T_d).

le conducteur dans la boucle. Ceci permet de passer d'un problème uniquement de maintien de voie -tel que formulé lorsque l'on avait uniquement le modèle V-R- à un problème où l'action du conducteur est intégrée. En complément des objectifs listés dans le cas d'un système de maintien de voie ordinaire, un objectif supplémentaire a été ajouté : la minimisation du conflit qui est caractérisé par la différence ($|T_d - T_c|$) et le produit des couples ($T_d \cdot T_c$). Cela peut être formalisé par la relation suivante :

$$(\alpha T_d - \beta T_c)^2 + 2(\alpha\beta)T_d T_c = q_{T_d} T_d^2 + R T_c^2 \quad (5.5)$$

Avec $q_{T_d} = \alpha^2$ est la pondération sur le couple conducteur et $R = \beta^2$ est celle sur le signal de commande. Le critère à minimiser devient :

$$J = \int_0^\infty z^T Q z + T_d q_{T_d} T_d + T_c R T_c dt \quad (5.6)$$

L'apparition du couple conducteur dans le vecteur d'état du système C-V-R, permet de l'inclure dans le vecteur de performance, ce qui donne : $z' = C'_z x_{va} = [\psi_L, y_L, \dot{\delta}, T_d]^T$.

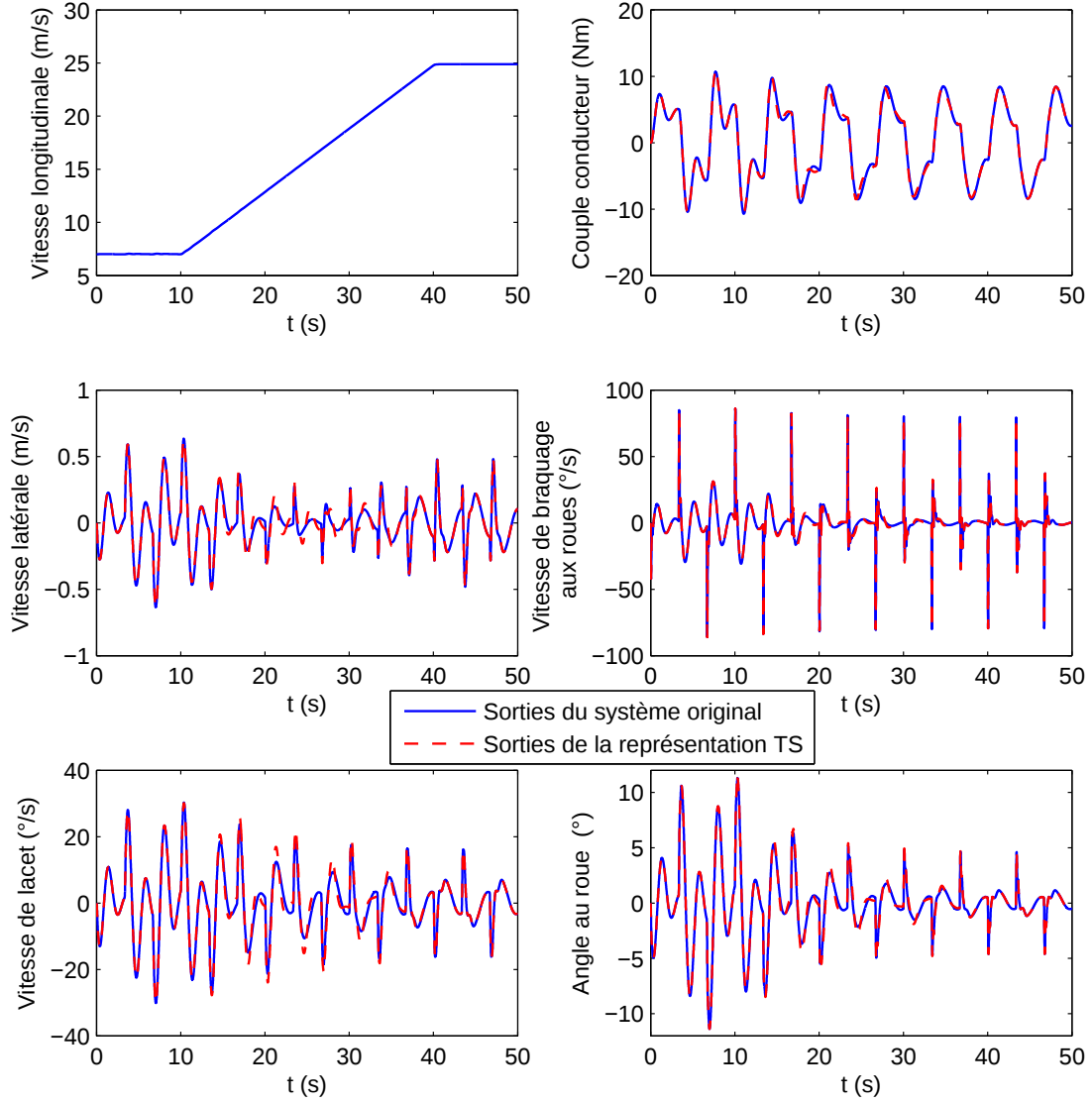


FIGURE 5.8 – Comparaison des sorties du modèle C-V-R (5.4) à celles de sa représentation TS.

Avec :

$$C'_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le critère (5.6) peut se réécrire comme suit :

$$J = \int_0^{\infty} z'^T Q' z' + T_c R T_c dt \quad (5.7)$$

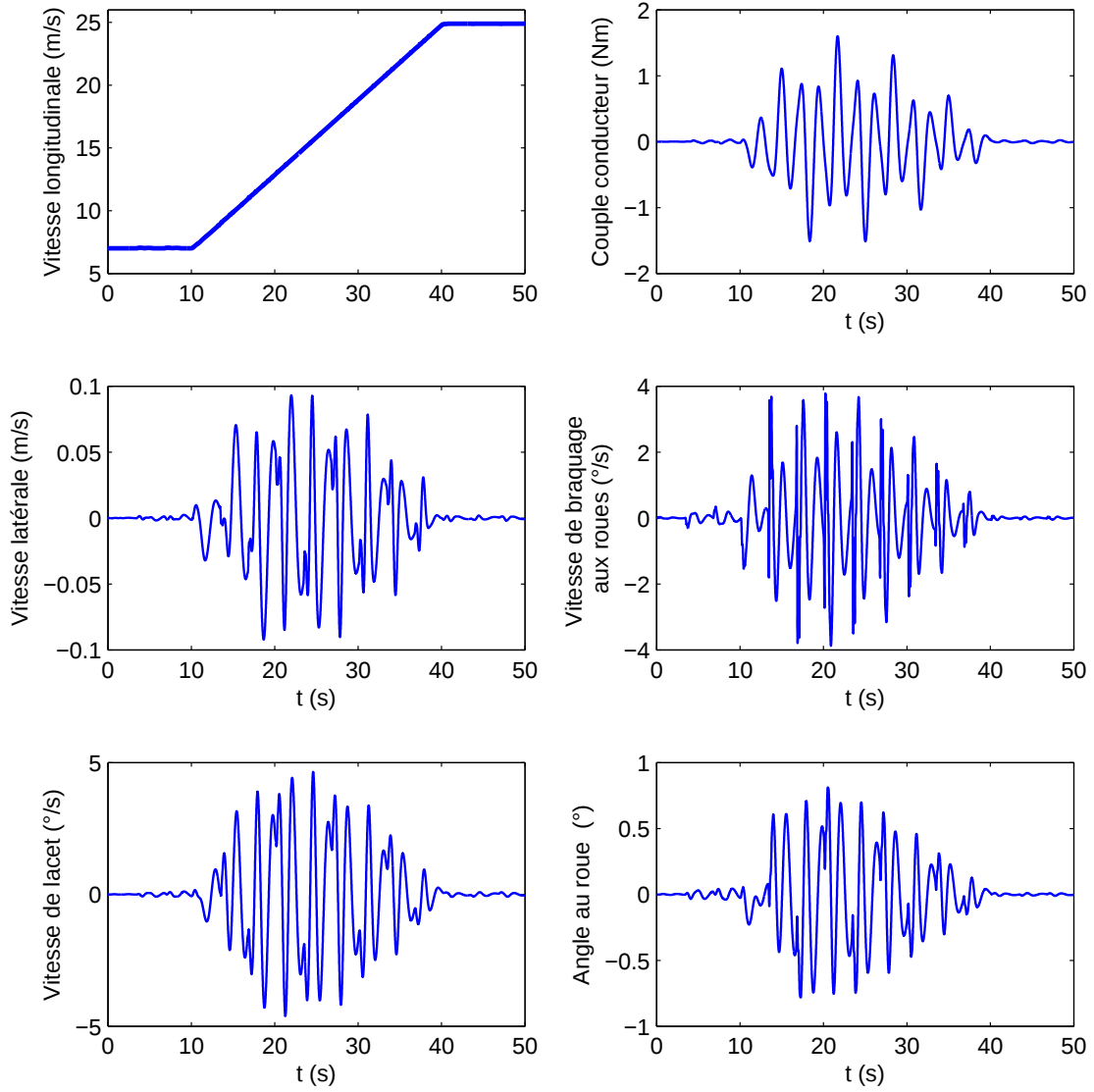


FIGURE 5.9 – Erreur de reproduction des sorties du modèle original C-V-R (5.4) par sa représentation TS.

Avec $Q' = \text{diag}(q_{\psi_L}, q_{y_L}, q_{\delta}, q_{T_d})$.

La démarche de synthèse du contrôleur latéral E-copilote2 pour le modèle C-V-R est la même que celle mise en œuvre considérant le modèle V-R seul. Le contrôleur TS à retour d'état obtenu, intègre le couple conducteur comme entrée. Le signal de commande T_c s'écrit :

$$T_c = \sum_1^4 K_i x_{va} = \underbrace{\sum_1^4 (K_{i1} x_v + K_{i2} T_d)}_{E\text{-copilote1}} \quad (5.8)$$

Donc le E-copilote2 peut s'interpréter comme étant le E-copilot1 avec en plus une action sur le couple conducteur.

En l'absence de couple conducteur le E-copilote2 se comporte comme le E-copilote1 et se charge de maintenir le véhicule sur la voie en minimisant l'erreur de cap et l'écart latéral. Lorsque le conducteur applique un couple de braquage, le E-copilote fait un compromis entre garantir les performances en matière de maintien de voie et suivre l'action du conducteur.

5.3.3 Validation de l'approche proposée en simulations numériques

Les résultats de simulations numériques de l'approche proposée sont rapportés sur la figure 5.10. Dans la première phase du scénario, les couples produits par "E-copilote2" et le conducteur

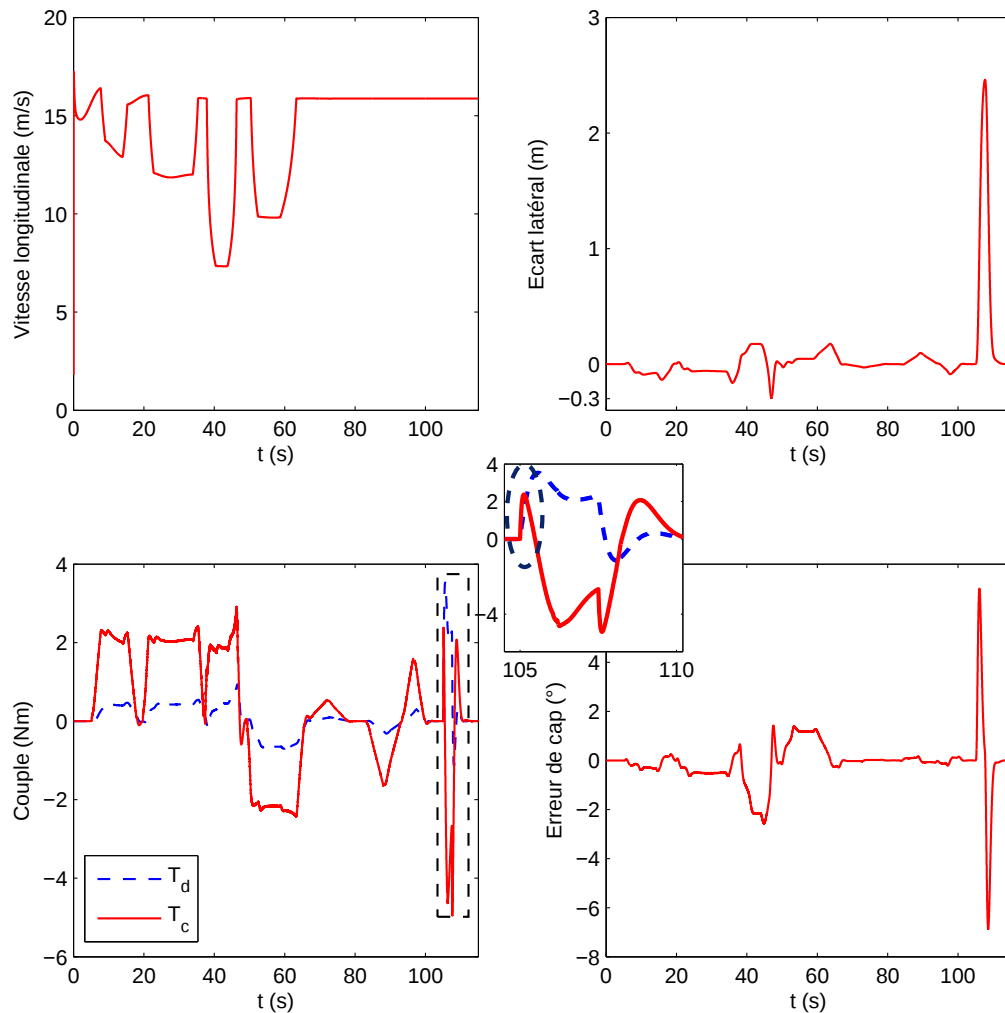


FIGURE 5.10 – Résultats obtenus pour une conduite partagée en simulation numérique.

sont de même signe et les performances en matière de maintien de voie réalisées sont similaires

à celles réalisées par le E-copilote1 avec le conducteur.

La différence majeure est visible dans la deuxième phase du scénario. Dans cette phase le comportement du E-copilote2 est complètement différent de celui du E-copilote1. Lorsque le conducteur initie la manœuvre d'évitement d'obstacle, tandis que le E-copilote1 contre immédiatement le conducteur, le E-copilote2 aide le conducteur dans l'initiation de sa manœuvre en délivrant un couple de braquage allant dans la même direction que celui du conducteur pour ensuite appliquer un couple de rappel pour d'une part inciter le conducteur à revenir au centre de sa voie de référence tout en l'informant que le " E-copilote " est toujours activé et d'autre part pour éviter que le véhicule aille trop loin dans la voie de gauche.

5.4 Validations sur le simulateur de conduite SHERPA

Afin de valider les résultats obtenus en simulation numérique, toutes les stratégies discutées dans la section précédente ont été intégrées dans le simulateur de conduite SHERPA pour des tests interactifs avec un conducteur humain. Les mêmes scénarios qu'en simulations numériques ont été réalisés. Durant la conduite, le conducteur a comme instruction de garder en permanence ses mains sur le volant.

5.4.1 Conduite avec E-copilote1

Les résultats de test en conduite avec le E-copilote1 sont rapportés sur la figure 5.11. Comme on peut le remarquer, les résultats obtenus en simulation numérique se confirment en simulation interactive. Néanmoins, dans la première phase du scénario, on mesure un couple conducteur très faible ce qui traduit le fait que le conducteur ne participe presque pas à la tâche de guidage. Il ne fait qu'accompagner les mouvements du volant comme on peut le remarquer sur chaque début de virage, surtout le premier. En termes de performance de guidage, le E-copilote arrive à maintenir le véhicule sur la route avec un bon positionnement : l'écart latéral maximal est de $49cm$ et une erreur de cap maximale de 4.55° .

La similitude des résultats est plus remarquable pour la deuxième phase du scénario. Comme on peut le voir sur la figure 5.11, les couples des deux intervenants s'opposent immédiatement après que le conducteur ait initié sa manœuvre d'évitement d'obstacle. Le couple conducteur atteint plus de $8.5N.m$ pour ne réaliser qu'un écart latéral maximal de $2.53m$.

5.4.2 Conduite avec E-copilote1 pondéré : partage par pondération

Les résultats de l'implémentation de cette stratégie dans le simulateur de conduite SHERPA sont rapportés sur la figure 5.12. Comme on peut le remarquer la aussi, dans la première phase du scénario, le conducteur garde ses mains sur le volant mais on mesure toujours un couple très faible à part à l'abord d'un virage ou à la sortie du virage. Le conducteur ne participe presque pas à la tâche de guidage. Le E-copilote, comme dans le premier cas, arrive à maintenir le véhicule sur la route avec un bon positionnement.

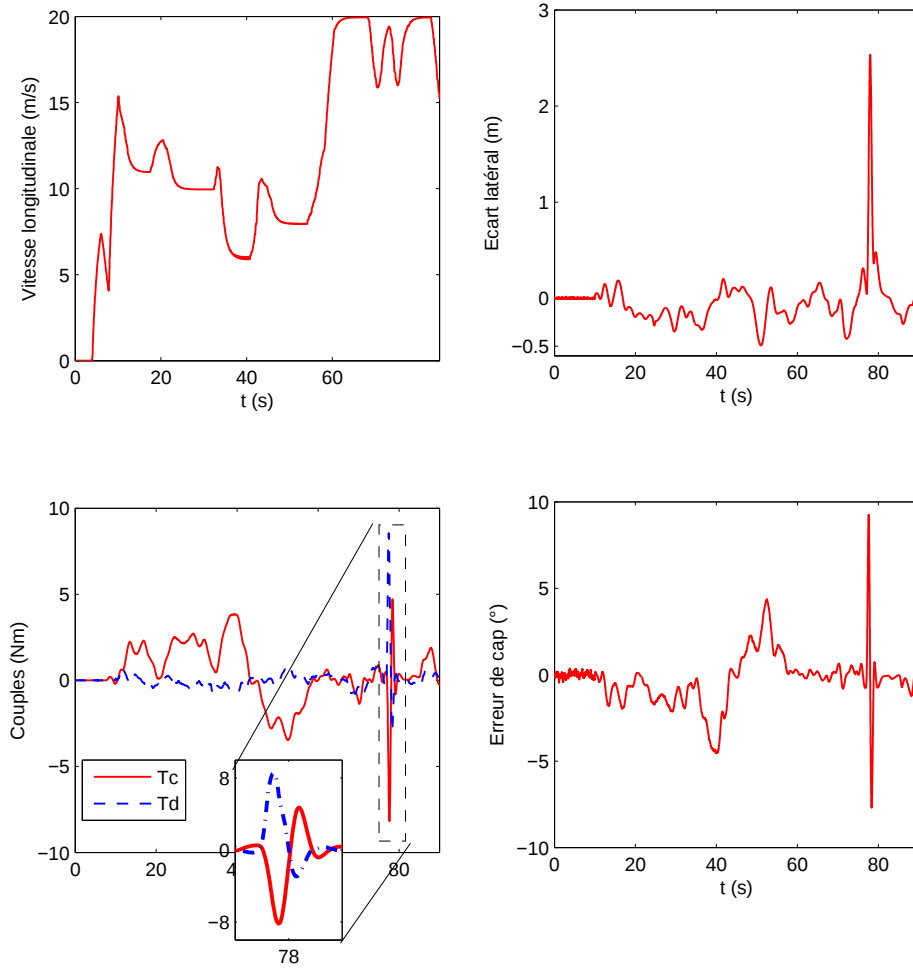


FIGURE 5.11 – Conduite partagée entre un conducteur humain et le E-Copilote1 pour une situation de suivi de voie et d'évitement d'un obstacle.

Dans la deuxième phase du scénario, en appliquant un couple maximal de $3.57N.m$ le conducteur arrive à s'écarter de $2.83m$. Ce résultat représente un gain en terme d'effort et de performance réalisée par rapport à la tâche (en termes d'écart latéral réalisé pour l'évitement). Il reste néanmoins que le conducteur est toujours contrôlé dès qu'il tente de réaliser sa manoeuvre.

5.4.3 Partage de conduite avec E-copilote2

Les résultats des tests de l'approche proposée avec un conducteur sont rapportés sur la figure 5.13.

La aussi, le comportement observé du E-copilote est similaire à celui obtenu dans les simulations numériques. Comme dans les deux tests précédents, le couple conducteur mesuré est très faible durant la première phase du scénario et c'est le E-copilote qui assure le maintien du véhicule sur la voie.

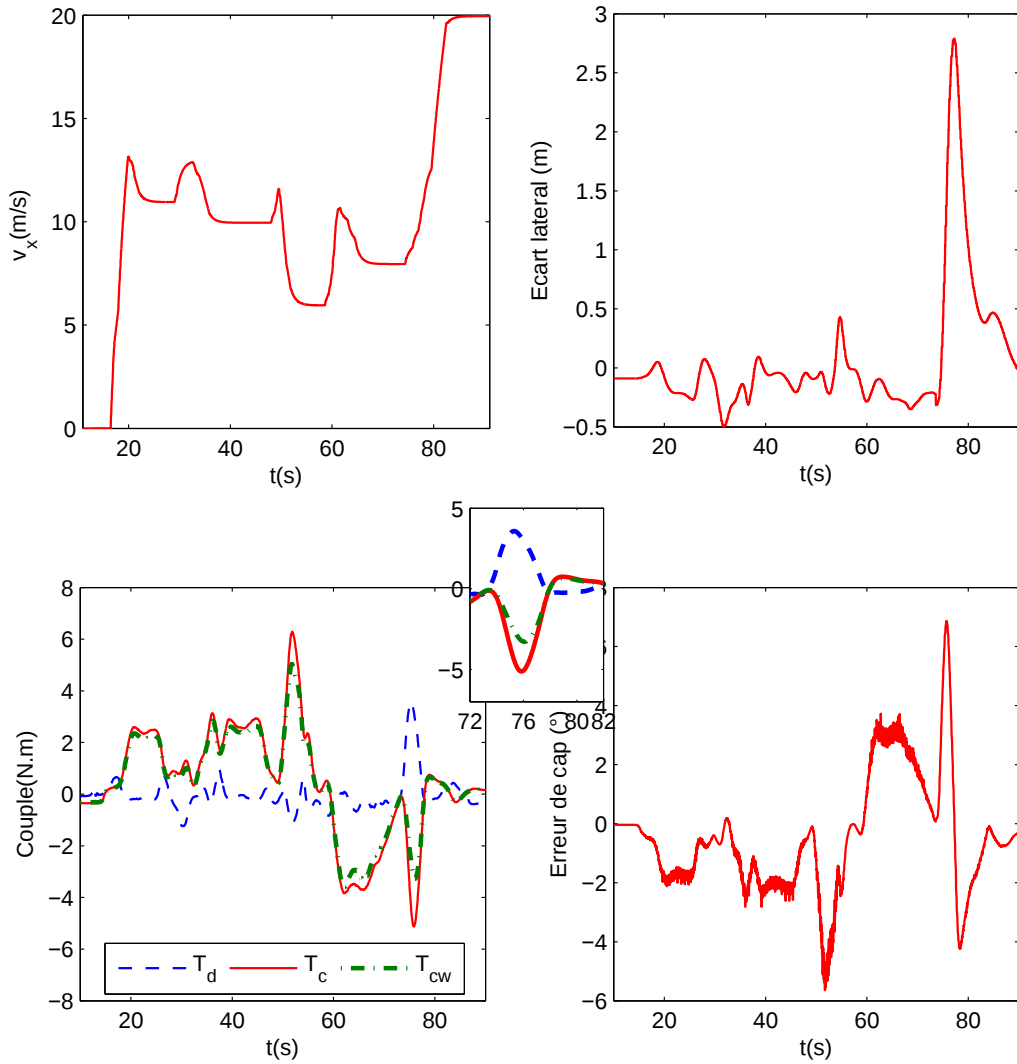


FIGURE 5.12 – Résultats obtenus sur SHERPA pour une conduite partagée avec E-copilote1 pondéré.

Le comportement du E-copilote est similaire à ce qui a été obtenu dans les simulations numériques. Lorsque le conducteur initie sa manœuvre d'évitement d'obstacle, pendant un court instant, le E-copilote délivre un couple aidant le conducteur à réaliser sa manœuvre, pour ensuite appliquer un couple de rappel évitant que le véhicule aille trop loin dans la voie de gauche. Ce fait peut être interprété comme une adaptation par le E-copilote de la "résistance" du système de direction du véhicule, ce qui est appelé par les auteurs de [2] "l'impédance haptique".

L'autre effet positif de ce comportement du E-copilote est que, dans un premier temps, il assiste le conducteur pour lui permettre de réaliser la manœuvre qu'il souhaite réaliser et ensuite manifeste sa présence par l'application d'un couple de rappel qui permettra au conducteur de rester

conscient que le E-copilote est toujours actif et de comprendre mieux la situation dans laquelle il se trouve (conscience de la situation).

Pour confirmer le comportement du E-copilote, le conducteur enchaîne trois doubles chan-

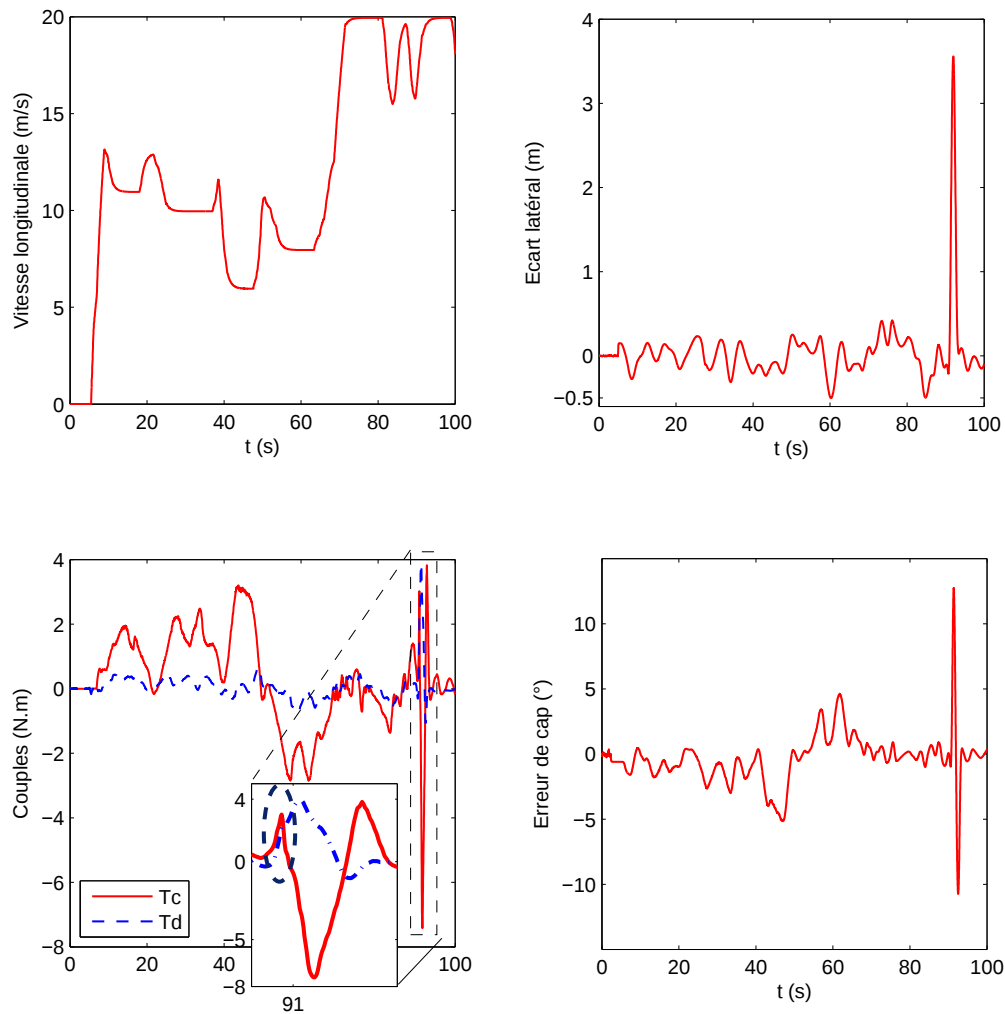


FIGURE 5.13 – Résultats obtenus sur SHERPA pour une conduite partagée avec E-copilote2.

gements de voie et les résultats sont rapportés sur la figure 5.14. On peut remarquer que le comportement du E-copilote est le même pour les trois manœuvres.

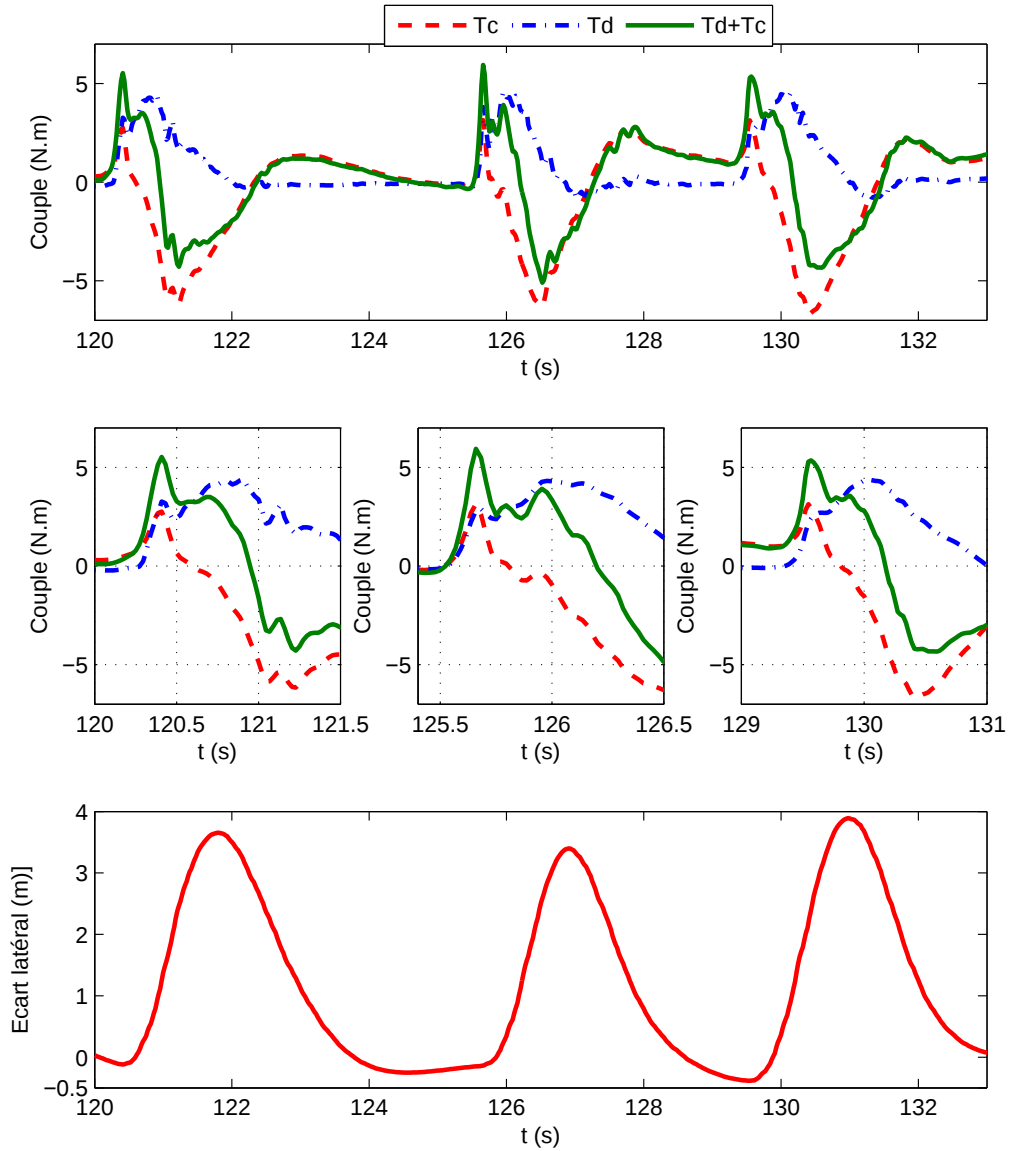


FIGURE 5.14 – Résultats pour trois manœuvres successives d'évitement d'obstacle (double changements de voie) réalisées sur le SHERPA.

5.5 Synthèse et discussion

Pour chaque essai, nous avons procédé à l'évaluation des performances réalisées en matière de maintien de voie, durant la première phase de la conduite, par le calcul de l'écart latéral maximal en valeur absolue ($|y_c|_m$) et l'erreur de cap maximale en valeur absolue ($|\psi_L|_m$). Le ressenti du conducteur est évalué par le calcul de l'effort consacré par lui (l'énergie du signal du couple de braquage) et par la commande ($E_{\{c,a\}}$) pour effectuer une tâche de conduite dans un

intervalle de temps $[t_1, t_2]$ tel que :

$$E_{\{c,d\}} = \int_{t_1}^{t_2} T_{\{c,d\}}^2(t) dt \quad (5.9)$$

Nous introduisons aussi un paramètre qu'on nomme degré de satisfaction dans un évitement d'obstacle qui est donné par :

$$W_d = \frac{\int_{t_1}^{t_2} y_c(t) dt}{E_d(t_1, t_2)} \quad (5.10)$$

5.5.1 Discussions des performances de maintien voie

Le tableau 5.1 récapitule les résultats des performances en matière de maintien de voie des différents essais réalisés en simulations numériques et interactives.

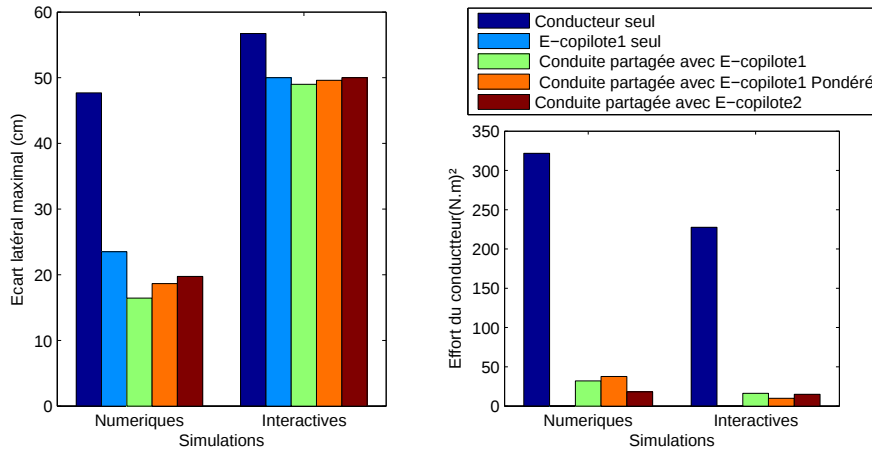


FIGURE 5.15 – Performances réalisées en matière de maintien de voie en écart latéral maximal (à gauche) et l'effort consacré par le conducteur (à droite) en simulations numériques et interactives.

Dans les simulations numériques, les performances en matière de maintien de voie ($|y_c|_m$ et $|\psi_L|_m$) obtenues avec le E-copilot1 conduisant avec le conducteur sont meilleures que celle obtenues pour tous les autres essais réalisés. Ce résultat est tout à fait logique puisqu'on renforce l'action du conducteur avec celle du E-copilot1 pour le même objectif qui est de minimiser l'erreur de positionnement du véhicule sur la route. L'effort consacré par le conducteur est $E_d = 32.01(N.m)^2$ et celui du E-copilot1 est $E_c = 164.92(N.m)^2$.

La participation du conducteur est minime devant celle du E-copilot1. L'approche basée sur la pondération de l'action du E-copilote n'a pas changé grand chose dans les efforts fournis par chacun des participants, puisque tous deux ont le même objectif qui est de minimiser l'erreur de positionnement du véhicule. Le E-copilote corrige déjà efficacement cette erreur, et donc, par **l'interaction indirecte** via la perception de cette erreur de positionnement [36], le conducteur fournit toujours un couple faible, d'où les faibles valeurs des efforts (voir le graphe 5.15).

Sur ce dernier point, les résultats sont quelque peu différents dans les essais avec un conducteur

TABLE 5.1 – Comparaison des performances de chacune des stratégies testées en matière du maintien de voie

Indicateur Test	$ y_c _m$ (cm)	$ \psi_L _m(^{\circ})$	$E_c(Nm)^2$	$E_d(Nm)^2$
Simulations numériques				
Conducteur seul	47.72	2.56	-	321.87
E-copilote1 seul	23.51	2.47	324.19	-
Conduite partagée avec E-copilote1	16.44	2.56	164.92	32.01
Conduite partagée avec E-copilote1 Pondéré	18.66	2.79	142.73	37.70
Conduite partagée avec E-copilote2	19.75	2.57	215.67	18.20
Simulations interactives sur SHERPA				
Conducteur seul	56.73	4.22	-	227.63
E-copilote1 seul	50	4.23	229.13	-
Conduite partagée avec E-copilote1	49	4.55	186.26	16.34
Conduite partagée avec E-copilote1 Pondéré	49.8	5.6	av pondération 340.1, après 264.48	10
Conduite partagée avec E-copilote2	50.1	5.16	206.95	15.08

humain. Comme on peut le remarquer sur les graphes des couples exposés (figures 5.11, 5.12 et 5.13), durant la première phase, le conducteur n'intervient presque pas, puisqu'il **réalise** ou **prend conscience** que le E-copilote (1, 1 pondéré et 2) assure le maintien de voie et ne fait qu'accompagner le volant. D'où les faibles valeurs des E_d dans la partie des simulations interactives (figure 5.15).

Comme première conclusion de cette partie, l'ajout du modèle conducteur pour la synthèse d'un contrôleur n'est pas d'un grand intérêt puisqu'il n'a pas un apport significatif.

Avec ces résultats, on peut dire que l'automatisation de la conduite peut remplacer le conducteur humain puisqu'elle permet de réaliser de meilleures performances et donc peut résoudre le problème de sortie involontaire de la route. Bien sur cette conclusion est conditionnée par un fonctionnement parfait des différents composants matériels et logiciels mis en jeu (les capteurs, les algorithmes de traitement et d'extraction d'informations, le système de planification de trajectoire) ainsi que les actionneurs chargés d'exécuter les commandes.

5.5.2 Discussion sur "la qualité" du partage

Le tableau 5.2 (voir aussi le graphe 5.16) résume les indicateurs relatifs à la qualité de partage entre le conducteur et les E-copilotes durant une manœuvre d'évitement d'obstacle pour toutes les stratégies testées.

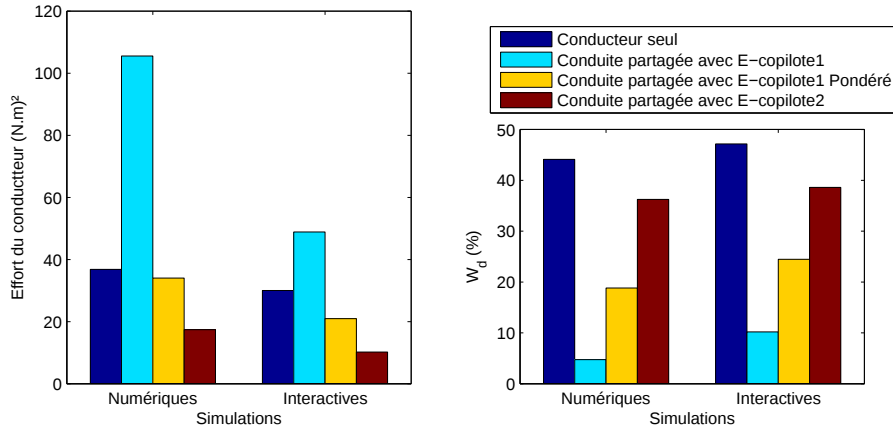


FIGURE 5.16 – Effort du conducteur lors de la manœuvre de l'évitement d'obstacle (à gauche) et les valeurs du paramètre W_d pour les différentes stratégies de partage testées (à droite).

Comme première remarque, on constate que l'effort consacré par le conducteur lorsqu'il conduit avec le E-copilote1 est le plus élevé parmi tous les tests réalisés. Cela est dû au fait que pour changer de voie et éviter l'obstacle, le conducteur ne doit pas uniquement vaincre le couple d'auto-alignement mais, en plus, celui du E-copilote qui le contre durant la manœuvre. La pondération de l'action du E-copilote1 a permis de réduire l'effort du conducteur de 67% dans la simulation numérique et de 50% en simulation interactive. Au delà de cette réduction, l'effort du conducteur est moindre que lorsqu'il réalise la manœuvre seul, puisque lorsque le conducteur conduit seul, il fournit un premier effort pour se déporter de sa voie de circulation puis un second effort pour revenir sur la voie d'origine (voir la figure 5.7), tandis que, lorsqu'il conduit avec le E-copilote1 pondéré, il fournit un effort pour se déporter avec une faible résistance de la part du E-copilote et moins d'effort pour revenir sur la voie initiale.

L'effort du conducteur est minimal lorsqu'il conduit avec le E-copilote2. C'est ce qui nous conduit à affirmer que le E-copilote2 ne se limite pas à ne pas contrer le conducteur, comme c'est le cas lorsqu'il conduit avec E-copilote1 pondéré ou pas, mais l'aide dans la réalisation de ses objectifs (voir la figure 5.17).

C'est ce que reflètent parfaitement les valeurs du paramètre W_d . Néanmoins, la valeur de W_d est maximale pour la conduite du conducteur seul, ce qui est dû au fait que le conducteur seul, lorsque qu'il fait un changement de voie, fait un dépassement du centre de la voie de gauche($y_c = 4.07m$ au lieu de $3.5m$ et $y_c = 4.06m$ en simulation numérique et sur SHERPA respectivement). Ce comportement est dû à la surcompensation par le conducteur durant cette manœuvre.

TABLE 5.2 – Comparaison des stratégies lors de l'évitement d'obstacle

Indicateur Test	$E_d(N.m)^2$	$E_c(N.m)^2$	$\max T_d(N.m)$	$ y_c _m(m)$	$W_d (\times 100)$
Simulations numériques					
Conducteur Seul	36.83	0	4.18	4.07	44.12
Conduite partagée avec E-copilote1	105.52	127.52	7	1.67	4.74
Conduite partagée avec E-copilote1 pondéré	34.02	78.23	5.93	2.74	18.83
Conduite partagée avec E-copilote2	17.39	38.07	3.83	2.63	36.24
Simulations interactives					
Conducteur humain	30.02	0	4.36	4.06	47.15
Conduite partagée avec E-copilote1	48.86	90.92	8.5	2.49	10.2
Conduite partagée avec E-copilote1 pondéré	24.72	av pondération :47 après : 20.35	3.57	2.83	24.47
Conduite partagée avec E-copilote2	10.22	35.87	3.85	3.58	38.6

La Figure (5.17) reporte une comparaison des comportements de E-copilote1 et E-copilote2 durant la manœuvre d'évitement d'obstacle réalisée sur SHERPA pour une même durée.

Au delà, des valeurs des couples appliqués sur la direction par le conducteur (T_d) pour les deux cas considérés, la différence des couples ($T_d - T_c$) pendant la phase d'évitement d'obstacle, dans le cas de la conduite partagée avec le E-copilote1, est nettement supérieure à celle mesurée lors de la conduite avec E-copilote2. Ce qui se traduit par l'importance du degré de conflit entre le conducteur et le E-copilote (environ $15N.m$ pour E-copilote1 contre $10N.m$ pour E-copilote2). A l'opposé, la somme des couples ($T_d + T_c$) mesurés pendant la phase d'évitement dans le cas de la conduite partagée avec le E-copilote2 est nettement supérieure à celle mesurée lors de la conduite avec E-copilote1. C'est ce qui a permis de faire le changement de voie plus aisément et plus rapidement avec moins d'effort de la part du conducteur.

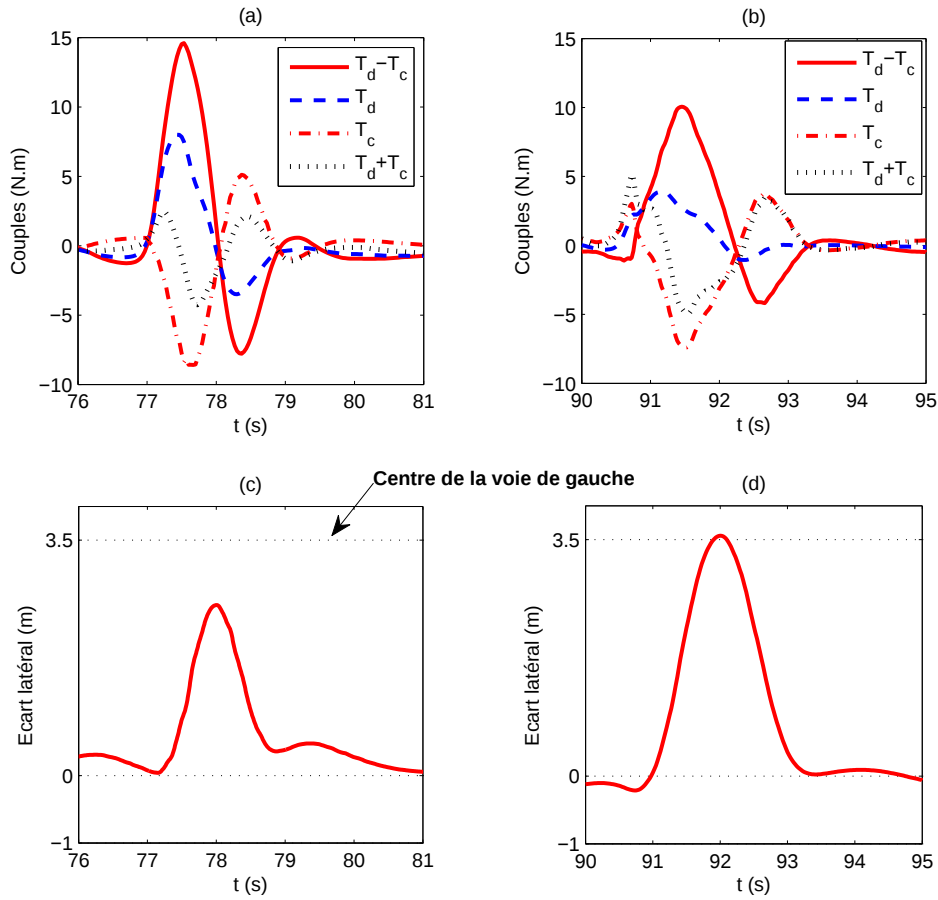


FIGURE 5.17 – Comparaison de la manœuvre d’évitement d’obstacle lors de la conduite partagée ; à gauche : avec E-copilote1, à droite : avec E-copilote2.

5.6 Partage avec retour sur le Haut Niveau de Coopération (HNC)

Dans cette section, nous présenterons les résultats d'une conduite partagée en faisant intervenir le HNC pour modifier la trajectoire cible ($Traj_c$) envoyée au contrôleur. Nous supposons être dans la configuration rapportée sur la figure 5.18 où, cette fois-ci, deux trajectoires sont fournies par le module de planification de trajectoire en plus de la trajectoire d'arrêt d'urgence. La première est le suivi de la voie courante ($Traj_1$) et la seconde est d'aller sur la voie de gauche ($Traj_2$).

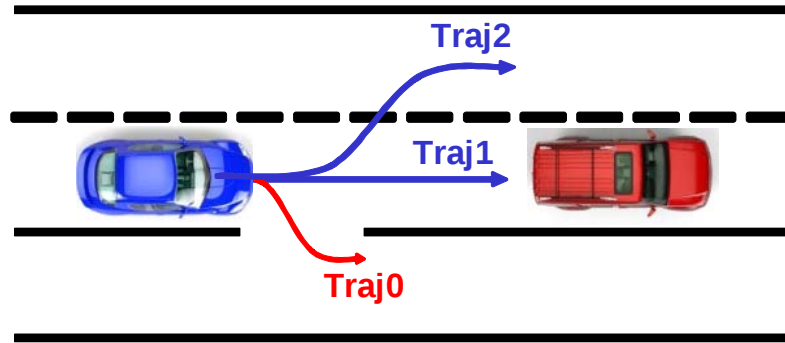


FIGURE 5.18 – Le cas où deux trajectoires de conduite sont disponibles.

Dans un premier temps, nous exposerons une approche utilisant le couple conducteur dans le critère de décision pour réaliser un changement de la trajectoire cible. Cette approche sera validée en simulations numériques uniquement puisque le planificateur de trajectoire utilisé sur le simulateur de conduite SHERPA est fourni par nos partenaires du projet ABV et n'est pas ouvert pour apporter les modifications souhaitées.

En simulations interactives, l'intervention du HNC pour le changement de trajectoire cible peut se faire soit via le volant en amenant le véhicule sur la voie de gauche (ou de droite) qui sera, par la suite, considérée comme la voie cible, ou bien, en utilisant directement le clignotant du véhicule.

5.6.1 Partage haptique avec retour sur le choix de la trajectoire

En restant dans la perspective du partage haptique, le changement de trajectoire cible du contrôleur se fera en fonction du couple conducteur. Lorsqu'on détecte une différence entre les couples (T_d) et (T_c) supérieure à un seuil ($|T_d - T_c| > \xi$), synonyme de **conflit**, le choix de la trajectoire est dicté par le signe du couple conducteur, c'est à dire : s'il est positif, aller à gauche et s'il est négatif aller à droite.

On définit la variable HNC_s permettant cette modification telle que :

$$HNC_s = \begin{cases} 0 & \text{si } T_d < \varepsilon \text{ et } |T_d - T_c| > \xi \\ 1 & \text{si } T_d > \varepsilon \text{ et } |T_d - T_c| > \xi \end{cases} \quad (5.11)$$

ε est une variable d'hystérésis visant à éviter les oscillations.

Par défaut la voie cible est celle de droite ($HNC_s = 0$). Ce choix est modifié en utilisant la relation suivante :

$$Traj_c = \begin{cases} Traj_1 & \text{si } HNC_s = 0 \text{ (droit)} \\ Traj_2 & \text{si } HNC_s = 1 \text{ (gauche)} \end{cases} \quad (5.12)$$

5.6.1.1 Simulations numériques

Le scénario décrit dans §5.2.1 avec une conduite entre E-copilote et le modèle conducteur en fixant le seuil ξ à $3.5 N.m$ est utilisé.

Comme durant la première phase du scénario les résultats sont similaires à ceux présentés avant l'introduction du HNC, seule la différence observée durant la deuxième phase et les résultats de la simulation pour la manœuvre d'évitement d'obstacle sont rapportés sur la figure 5.19.

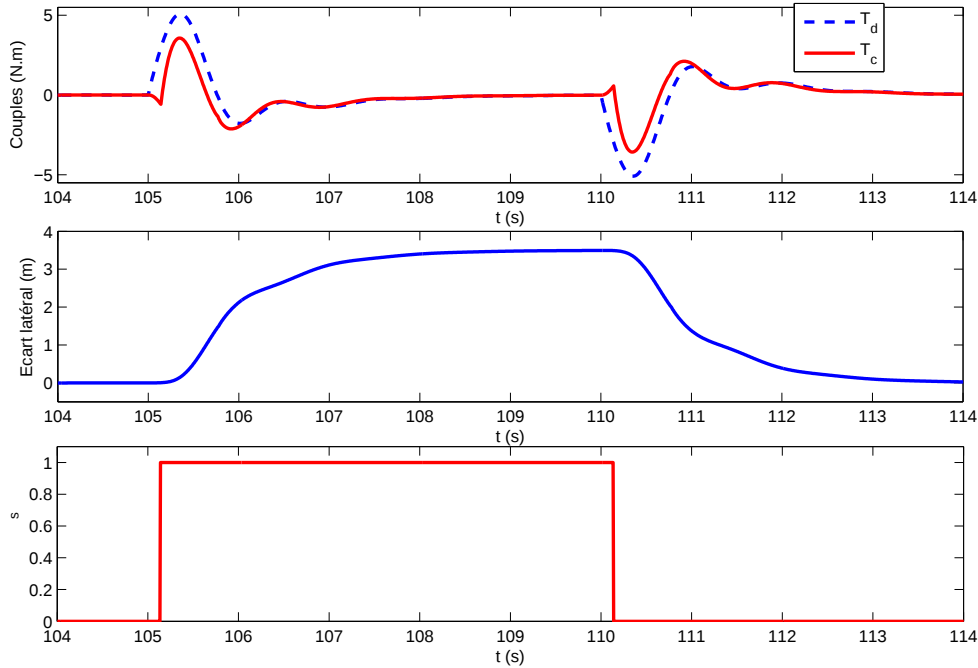


FIGURE 5.19 – Résultat de simulation pour une conduite partagée avec l'intervention du module HNC pour réaliser un évitement d'obstacle.

Comme on peut le remarquer, le E-copilote s'oppose au conducteur dans un premier instant puis, dès que la différence des couples dépasse $3.5 N.m$, la variable HNC_s passe à 1 et le E-copilote change de trajectoire de référence, et délivre un couple dans le sens de celui du conducteur. Le même scénario se répète pour le retour sur la voie de droite. Le conducteur, assisté par le E-copilote, arrive à aller sur la voie de gauche puis revenir sur la voie de droite avec moins de difficultés. L'effort du conducteur calculé pour réaliser la manœuvre est $E_d = 21.70(N.m)^2$ et celui du E-copilote est $E_c = 10.28(N.m)^2$.

5.6.2 Simulation interactive avec retour sur le choix de la trajectoire

Comme déjà signalé, sur le simulateur de conduite le changement de la trajectoire cible peut se faire de deux façons. La première est d'amener le véhicule sur la voie de circulation désirée que le système gardera comme voie cible. Une autre possibilité offerte au conducteur est d'indiquer sa volonté de changer de voie avec le clignotant directement.

La figure 5.20 rapporte les résultats d'un test de conduite dans lequel le conducteur réalise une séquence de changement de voie via le volant le véhicule ou en utilisant le clignotant.

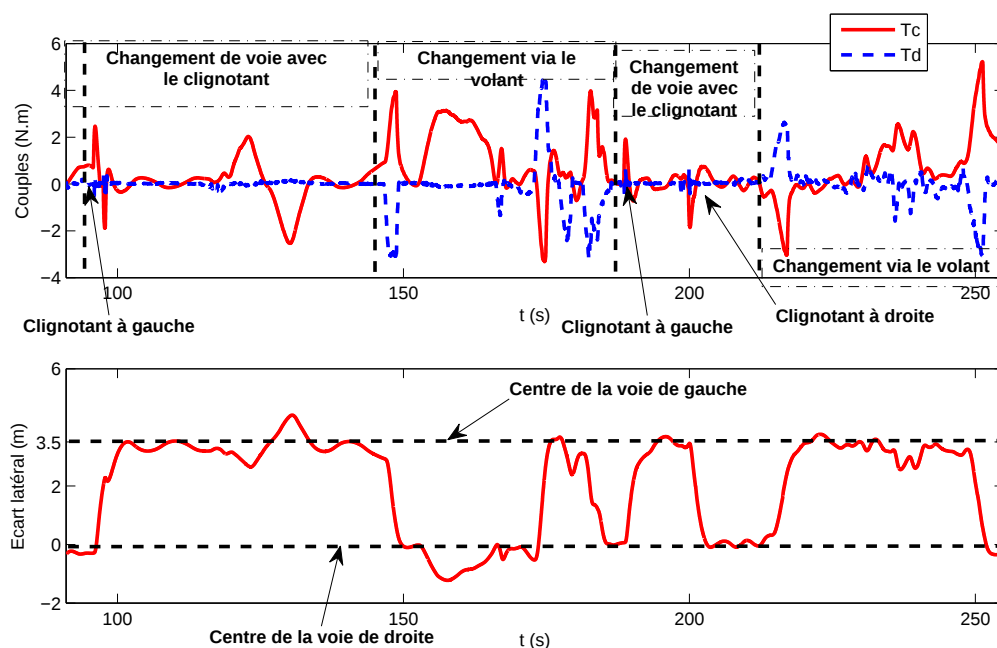


FIGURE 5.20 – Séquence de changement de voie pour une conduite partagée avec intervention du HNC réalisée en interactive sur le simulateur SHERPA.

comme on peut le voir lors de la manœuvre, le conducteur doit fournir un couple en opposition à celui du E-copilote, et lorsqu'il utilise le clignotant, il ne fournit aucun effort.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité de la problématique du partage du contrôle latéral entre un conducteur et un E-copilote. Dans un premier temps, la problématique du partage est soulevée en introduisant, dans la boucle de contrôle latéral du véhicule, un conducteur et un E-copilote conçu pour le maintien de voie. Cela a permis de mettre en avant la nécessité de laisser une liberté d'action au conducteur en exploitant l'information relative au couple de braquage qu'il applique sur le volant : c'est **"le partage haptique"**. Par la suite, comme première solution, le couple issu du E-copilote est pondéré en fonction du couple conducteur, ce qui a permis de

laisser plus de liberté au conducteur pour réaliser des manœuvres en opposition avec l'objectif du E-copilote. Par contre le conducteur est toujours contré dès qu'il a un objectif différent de celui du E-copilote. Pour remédier à ce problème, nous avons introduit un modèle conducteur pour la synthèse d'un contrôleur intégrant le partage haptique comme objectif en plus de ceux de maintien de voie. Comme le contrôleur obtenu a comme entrée le couple conducteur en plus de la dynamique de positionnement du véhicule sur la route, on peut dire qu'un canal de communication haptique est établi entre le conducteur et le E-copilote.

Les différents résultats obtenus en simulation numérique se confirment par la validation réalisée en simulations interactives sur le simulateur SHERPA.

A la fin du chapitre, nous avons illustré l'apport du module HNC pour résoudre un conflit entre le conducteur et le E-copilote en exploitant directement l'information sur les couples des deux intervenants pour modifier la trajectoire de référence. L'apport de ce module a été testé en simulation numérique et en simulations interactives.

Chapitre 6

Perspectives d'intégration : Développement d'un observateur et schéma global de fonctionnement

Sommaire

6.1	Introduction	112
6.2	Observateur TS à entrée inconnue	113
6.2.1	Application pour l'estimation de la dynamique latérale du véhicule et du couple conducteur	115
6.2.1.1	Observabilité du modèle considéré	116
6.2.1.2	Résultats de simulations numériques	117
6.2.2	La région $\mathcal{D}$ -Stabilité et le placement de pôles LMI	117
6.2.2.1	La région LMI et $\mathcal{D}$ -Stabilité	117
6.2.3	Placement de pôles de l'observateur TS	120
6.3	Validation en simulations numériques	120
6.4	Intégration de l'observateur dans la boucle de commande	124
6.5	Validation de l'observateur sur le simulateur SHERPA-LAMIH	128
6.6	Intégration du système global dans le simulateur SHERPA	132
6.6.1	Interface graphique du prototype	135
6.7	Conclusion	138

Dans le chapitre précédent, pour les deux stratégies de partage proposées, la connaissance du vecteur d'état du véhicule ainsi que le couple de braquage du conducteur sont nécessaires. Dans l'optique d'une future intégration sur un véhicule réel de ces approches, et comme toutes les variables d'état du véhicule ne sont pas accessibles, nous proposons dans ce chapitre un observateur TS proportionnel multi intégral à entrée inconnue (TSPMIEI) pour l'estimation de l'état du véhicule ainsi que du couple de braquage du conducteur que l'on considère comme une entrée inconnue polynomiale.

En fin de chapitre, l'intégration du schéma global de partage de la conduite dans simulateur de conduite SHERPA-LAMIH est exposée avec les différents modes de fonctionnement ainsi que l'interface homme-machine développée.

6.1 Introduction

Les observateurs sont nécessaires dans la plupart des cas comme une alternative aux capteurs, lorsqu'on ne dispose pas de capteur pour la mesure d'une grandeur physique, ou bien, lorsque le coût de ce capteur est prohibitif.

Plusieurs méthodes d'observation existent dans la littérature pour le cas des systèmes linéaires. Deux approches sont introduites dès les années soixante. La première par Kalman [62] et la seconde par Luenberger [80]. Le filtre de Kalman est une approche temporelle se présentant comme un filtre optimal au sens à minimiser la variance de l'erreur entre les variables mesurées et leurs estimations. L'observateur de Luenberger se présente, quant à lui, comme une matrice de gains constants de retour de sortie. Il possède une caractéristique très intéressante connue sous le nom de *principe de séparation* : dans le cas d'une commande linéaire par retour d'état, les travaux de synthèse de commande et de synthèse d'observateur peuvent se faire de façon indépendante. Cependant, il est plus approprié pour les systèmes où les mesures ne sont pas bruitées.

Pour les systèmes non-linéaires, l'étude de l'observabilité reste un sujet de recherche, et jusqu'à présent aucune méthode n'existe pour élaborer un observateur valide pour tous les systèmes non-linéaires. Par ailleurs, comme déjà exposé dans le chapitre 4, une large partie des systèmes non-linéaires peuvent être approximés par un modèle flou TS. Dans la littérature plusieurs méthodes d'observation inspirées des méthodes existantes et adaptées pour le contexte de TS sont proposées : Thau-Luenberger [130], Observateur TS mode glissant [146], observateur TS à entrée inconnue [75].

L'observateur à entrée inconnue, proposé dans un premier temps par [89], est une extension de l'observateur Luenberger. Ce type d'observateur est très utilisé pour le diagnostic et l'isolation des défauts [67]. Dans [59] un observateur TS proportionnel intégral (PI) et un proportionnel multi-intégral (PMI) sont proposés pour l'estimation de l'état et des entrées inconnues de type polynomiales d'un système représenté par un modèle TS et dans [75] les auteurs proposent le même observateur mais en considérant deux cas, le premier, considérant des entrées inconnues de forme polynomiale et le second les considérant comme le résultat des dynamiques négligées. Dans la suite nous avons adopté l'observateur PMI pour l'estimation de la vitesse latérale du véhicule ainsi que celle du couple de braquage du conducteur considéré comme entrée inconnue polynomiale.

6.2 Observateur TS à entrée inconnue

Soit la représentation TS d'un système non-linéaire avec entrées inconnues telle que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i [A_i x(t) + B_i u(t) + U_i \mu(t) + W_i w(t)] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i C_i x(t) + W_y w(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

Avec : $x(t) \in \mathbf{R}^n$, représente le vecteur d'état du système. $u(t) \in \mathbf{R}^m$ et $y(t) \in \mathbf{R}^{n_y}$ sont les vecteurs, respectivement, des entrées et des sorties. $w(t) \in \mathbf{R}^q$ et $\mu(t) \in \mathbf{R}^l$ sont les vecteurs, respectivement, des perturbations du système et des entrées inconnues. $A_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $C_i \in \mathbf{R}^{n_y \times n}$, $U_i \in \mathbf{R}^{n \times l}$, $W_i \in \mathbf{R}^{n \times q}$ et $W_y \in \mathbf{R}^{n_y \times q}$ sont les matrices constantes du i^{eme} sous-systèmes du modèle TS.

En supposant que la matrice de sortie est constante ($C_i = C \forall i$) et une entrée inconnue polynomiale d'ordre $p - 1$ ($\mu^{(p)} = 0$) observable à partir des sorties, les estimation de l'état du système (x) ainsi que de l'entrée inconnue (μ) du modèle TS (6.1) peuvent être obtenues par l'observateur TS donné par [75, 59] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + U_i \hat{\mu}(t) + L_{Pi}(y(t) - \hat{y}(t))] \\ \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i C \hat{x} \\ \hat{\mu}^{(p)}(t) = \sum_{i=1}^r h_i L_{Ti}^p (y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{\mu}^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^r h_i L_{Ti}^k (y(t) - \hat{y}(t)) + \hat{\mu}^{(k+1)}(t), \quad k = 1..p - 1 \end{cases} \quad (6.2)$$

Où $\hat{x}(t)$ est l'estimer du vecteur d'état, $\hat{\mu}^{(k)}(t)$ est l'estimé de la k^{eme} dérivé de l'entrée inconnue $\mu(t)$. L_{Pi} et L_{Ti}^k , $i = 1..r$ sont, respectivement, les gains proportionnels et intégrales de l'observateur.

Remarque 6.1 Dans la suite la notation de x à la place de $x(t)$ sera adoptée pour toutes les variables.

Les conditions nécessaires et suffisantes pour l'existence de l'observateur (6.2) sont [67] :

Pour $i = 1..r$.

- Les paires (A_i, C) sont détectables.
- Le rang de la matrice $[CU_i]$ est égal au rang de la matrice U_i , c'est à dire :

$$rank(CU_i) = rank(U_i) = 1$$

- et $rank \begin{bmatrix} I_n & U_i \\ C & 0_{n_y \times 1} \end{bmatrix} = n + 1$

L'équation (6.2) peut se réécrire :

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{\mu}} \\ \vdots \\ \dot{\hat{\mu}}^{(p)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i \begin{pmatrix} A_i & U_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{\mu} \\ \vdots \\ \hat{\mu}^{(p-1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_i \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} L_{pi} \\ L_{Ii}^1 \\ \vdots \\ L_{Ii}^p \end{pmatrix} (y - \hat{y}) \quad (6.3)$$

En remplaçant $y = Cx + W_y w$, $\hat{y} = C\hat{x}$ et en définissant $\hat{x}_a = [\hat{x}, \hat{\mu}, \dots, \hat{\mu}^{p-1}]^T$,

$$\check{A}_i = \begin{bmatrix} A_i - L_{pi}C & U_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \check{\Gamma}_i = \begin{bmatrix} L_{pi}W_y \\ L_{Ii}^1W_y \\ \vdots \\ L_{Ii}^pW_y \end{bmatrix}$$

$$\check{L}_i = [L_{pi} \dots L_{Ii}^p]^T \quad \check{B}_i = [B_i \ 0 \dots 0]^T$$

$$\check{W}_i = [W_i \ 0 \dots 0]^T \text{ et } \check{C} = [C \ 0 \dots 0]$$

La dynamique globale de l'observateur TS devient alors :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_a = \sum_{i=1}^r h_i [(\check{A}_i - \check{L}_i\check{C})\hat{x}_a + \check{B}_i u + \check{L}_i\check{C}\hat{x}_a + \check{\Gamma}_i w] \\ \hat{y} = \sum_{i=1}^r h_i \check{C}\hat{x}_a \end{cases} \quad (6.4)$$

Soit $e = [x - \hat{x}, \mu - \hat{\mu}, \dots, \mu^{p-1} - \hat{\mu}^{p-1}]^T$ l'erreur d'estimation de l'observateur.

La dynamique de cette erreur est donnée par :

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^r h_i (\check{A}_i - \check{L}_i\check{C})e + \sum_{i=1}^r h_i (\check{\Gamma}_i + \check{W}_i)w \quad (6.5)$$

La convergence de cette erreur vers zéro, en l'absence de perturbation ($w = 0$), dépend uniquement de sa matrice dynamique $(\sum_{i=1}^r h_i (\check{A}_i - \check{L}_i\check{C}))$. La recherche des gains $\check{L}_i$ garantissant la stabilité de (6.5) (convergence de $\hat{x} \rightarrow x$) est donnée par le théorème suivant :

Théorème 6.1 *Le système (6.5) pour $w = 0$ est exponentiellement stable s'il existe une matrice commune symétrique positive ($X = X^T > 0$) et les matrices $\check{M}_i = X\check{L}_i$ telles que :*

$$X\check{A}_i - \check{M}_i\check{C} + \check{A}_i^T X - \check{C}^T \check{M}_i^T < 0, \quad i = 1..r \quad (6.6)$$

dans ce cas, les gains $\check{L}_i$ sont donnés par $\check{L}_i = X^{-1}\check{M}_i$.

Remarque 6.2 Ce résultat exploite le résultat du lemme 4.3 exposé dans le chapitre 4.

La démonstration de ce théorème, découle directement du théorème de Lyapunov et est similaire à la démonstration du théorème 4.1).

Si on suppose que la perturbation externe est bornée, les conditions suffisantes pour la stabilité de (6.5) et donnant les gains $\check{L}_i$ permettant de minimiser le gain $\mathcal{L}_2$ du transfert des perturbations w vers e , sont formalisées par le théorème suivant.

Théorème 6.2 [58] *L'observateur TS (6.4) a un minimum d'atténuation de perturbation de $\gamma > 0$ ($\|e\|_2 < \gamma^2 \|w\|_2$), si et seulement si, il existe une matrice commune symétrique positive $X = X^T > 0$, satisfaisant les contraintes LMIs suivantes.*

minimiser γ_2 telle que :

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_i + I & \check{M}_i W_y + X \check{W}_i \\ W_y^T \check{M}_i^T + \check{W}_i^T X & -\gamma_2 I \end{bmatrix} < 0, \quad \forall i = 1..r \quad (6.7)$$

Avec :

$$\Upsilon_i = X \check{A}_i - \check{M}_i \check{C} + \check{A}_i^T X - \check{C}^T \check{M}_i^T \quad (6.8)$$

et $\gamma_2 = \gamma^2$. Dans le cas où le problème est faisable, les gains de l'observateur sont donnés par $\check{L}_i = X^{-1} M_i$.

Remarque 6.3 Le changement de variable $\gamma_2 = \gamma^2$ est introduit pour que le problème LMI (6.7) soit linéaire.

Démonstration :

Soit $V(e) = e^T X e$ telle que $X = X^T > 0$ et le critère

$$\dot{V}(e) + e^T e - \gamma^2 w^T w < 0 \quad (6.9)$$

On a $\dot{V}(e) = \dot{e}^T X e + e^T X \dot{e}$. En remplaçant l'expression de $\dot{e}$ (6.5) dans (6.9), après calcul, on aura :

$$\sum_{i=1}^r h_i \begin{pmatrix} e \\ w \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \Upsilon_i + I & X(\check{\Gamma}_i + \check{W}_i) \\ (\check{\Gamma}_i + \check{W}_i)^T X & -\gamma^2 I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ w \end{pmatrix} < 0 \quad (6.10)$$

En exploitant le résultat du lemme 4.3 et en utilisant les deux changements de variables ($\gamma_2 = \gamma^2$, $\check{M}_i = X L_i$), on retrouve le résultat (6.7).

6.2.1 Application pour l'estimation de la dynamique latérale du véhicule et du couple conducteur

La figure 6.1 rapporte le schéma global du système conducteur-véhicule-observateur avec un des contrôleurs qui ont fait l'objet du chapitre précédent.

Pour la synthèse de l'observateur nous considérons un modèle véhicule réduit où on ne considère

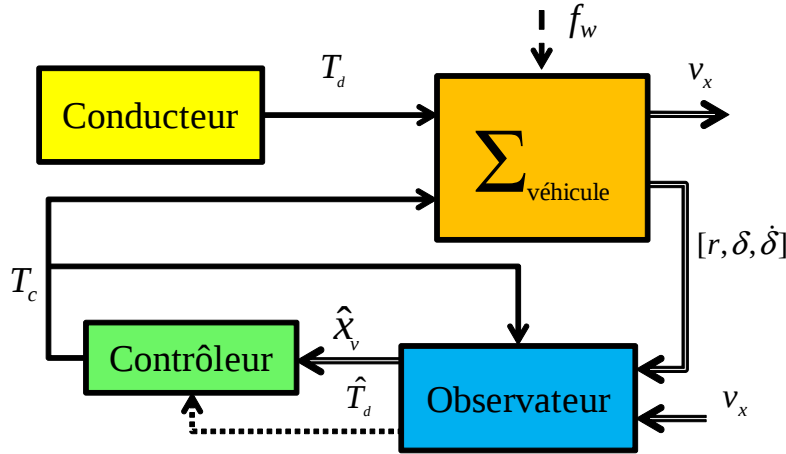


FIGURE 6.1 – Schéma global d'observation et de commande

pas les deux variables de positionnement (y_L et ψ_L), ce qui donne le vecteur d'état $x_r = [v_y, r, \delta, \dot{\delta}]$ et la dynamique du système est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_{ur}(T_c(t) + T_d(t)) + B_{wr}f_w(t) \\ y(t) = C_r x_r(t) \end{cases} \quad (6.11)$$

Les matrices du système sont :

$$A_r = \begin{pmatrix} -\rho_2 \frac{C_r + C_f}{m} & -\rho_1 + \rho_2 \frac{l_r C_r - l_f C_f}{m} & \frac{C_f}{m} & 0 \\ \rho_2 \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I_z} & -\rho_2 \frac{l_r^2 C_r + l_f^2 C_f}{I_z} & \frac{l_f C_f}{I_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \rho_2 \frac{C_f l_f \eta_t}{J_s R_s} & \rho_2 \frac{C_f l_r \eta_t}{J_s R_s} & -\frac{C_f \eta_t}{J_s R_s} & -\frac{B_s}{J_s} \end{pmatrix}, \quad B_{ur} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_s} \end{pmatrix}, \quad B_{wr} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \\ \frac{l_w}{I_z} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

et $C_r = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Les entrées du système sont : le couple de la commande (T_c) considéré comme l'entrée connue et le couple conducteur (T_d) considérée comme entrée inconnue. On suppose qu'on mesure la vitesse de lacet du véhicule (r), l'angle de braquage des roues (δ) et la vitesse de braquage des roues ($\dot{\delta}$). La force du vent latéral (f_w) est considérée comme la perturbation à rejeter.

La représentation TS de ce modèle est similaire à celle du modèle véhicule ignorant les deux variables de positionnement.

6.2.1.1 Observabilité du modèle considéré

L'observabilité du modèle TS du véhicule avec l'entrée inconnue est vérifiée comme le montre le calcul suivant :

Toutes les matrices (A_i, C) sont détectables.

La matrice de l'entrée inconnue U est la même que la matrice B du modèle véhicule et le rang

de la matrice (CU) est égal au rang de la matrice U ($\text{rank}(CU) = \text{rank}(U) = 1$).

Le rang de la matrice $\begin{bmatrix} I_n & U_i \\ C & 0_{n_y \times l} \end{bmatrix}$ est de $5(4+1)$.

6.2.1.2 Résultats de simulations numériques

En considérant que le couple conducteur est d'ordre polynomial égal à 2 ($\ddot{T}_d = 0$), en exploitant directement le résultat du théorème 6.2, l'observateur obtenu est évalué en simulation par l'excitation du modèle véhicule par un couple de braquage -conducteur- en entrée inconnue (T_d) sous forme d'un signal en dents de scie, d'une amplitude de $5N.m$, filtré avec un filtre de bande passante de $5Hz$ ($T_d = 5scie(0.2 \times 2\pi t)$). A ce couple est additionné à un deuxième couple de braquage en entrée connue en signal carré d'une amplitude de $(2.5N.m)$ et d'une fréquence de $0.4Hz$ ($T_e = 2.5carre(0.4 \times 2\pi t)$). La perturbation du vent latéral est un signal en dents de scie d'une force de $550N.m$ et d'une fréquence de $0.08Hz$ ($f_w = 550scie(0.08 \times 2\pi t)$). La vitesse longitudinale du véhicule est variable de 7 à $25m/s$.

L'observateur obtenu nécessite un temps important pour converger à une erreur nulle et ne permet pas de suivre les variations des différentes variables à estimer comme le montrent les résultats rapportés sur la figure 6.2.

Pour améliorer les performances de l'observateur, on propose d'imposer certaines performances (temps de convergence, fréquence de résonance...) par un **placement des pôles** des sous-systèmes de l'observateur TS dans une région $\mathcal{D}$ du plan complexe.

6.2.2 La région $\mathcal{D}$ -Stabilité et le placement de pôles LMI

L'intérêt de parler de placement des pôles d'un système dans une région spécifique dans le plan complexe vient du fait que le comportement temporel d'un système linéaire est caractérisé par l'emplacement de ses pôles. En effet, il est bien connu, en automatique, que la réponse d'un système dynamique "linéaire" dépend de ses pôles (valeurs propres) en transitoire et que la convergence du système à son état stationnaire, dépend de son pôle dominant (plus petite valeur propre en valeur absolue). Pour le cas des systèmes non-linéaires, il n'est pas commode de parler de pôles, puisque c'est une caractéristique propre aux systèmes linéaires. Cependant, comme les modèles TS sont une combinaison de sous-systèmes linéaires, en imposant que tous ses sous-modèles aient des pôles dans une région prédéfinie, on s'attend (puisque les fonctions h_i sont non-linéaires) à ce que le système global ait les mêmes caractéristiques temporelles que les sous-modèles composant sa modélisation TS.

6.2.2.1 La région LMI et $\mathcal{D}$ -Stabilité

Soit $\mathcal{D}$ une région de la partie gauche du plan complexe et λ le vecteur des valeurs propres de la matrice dynamique du système autonome :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (6.12)$$

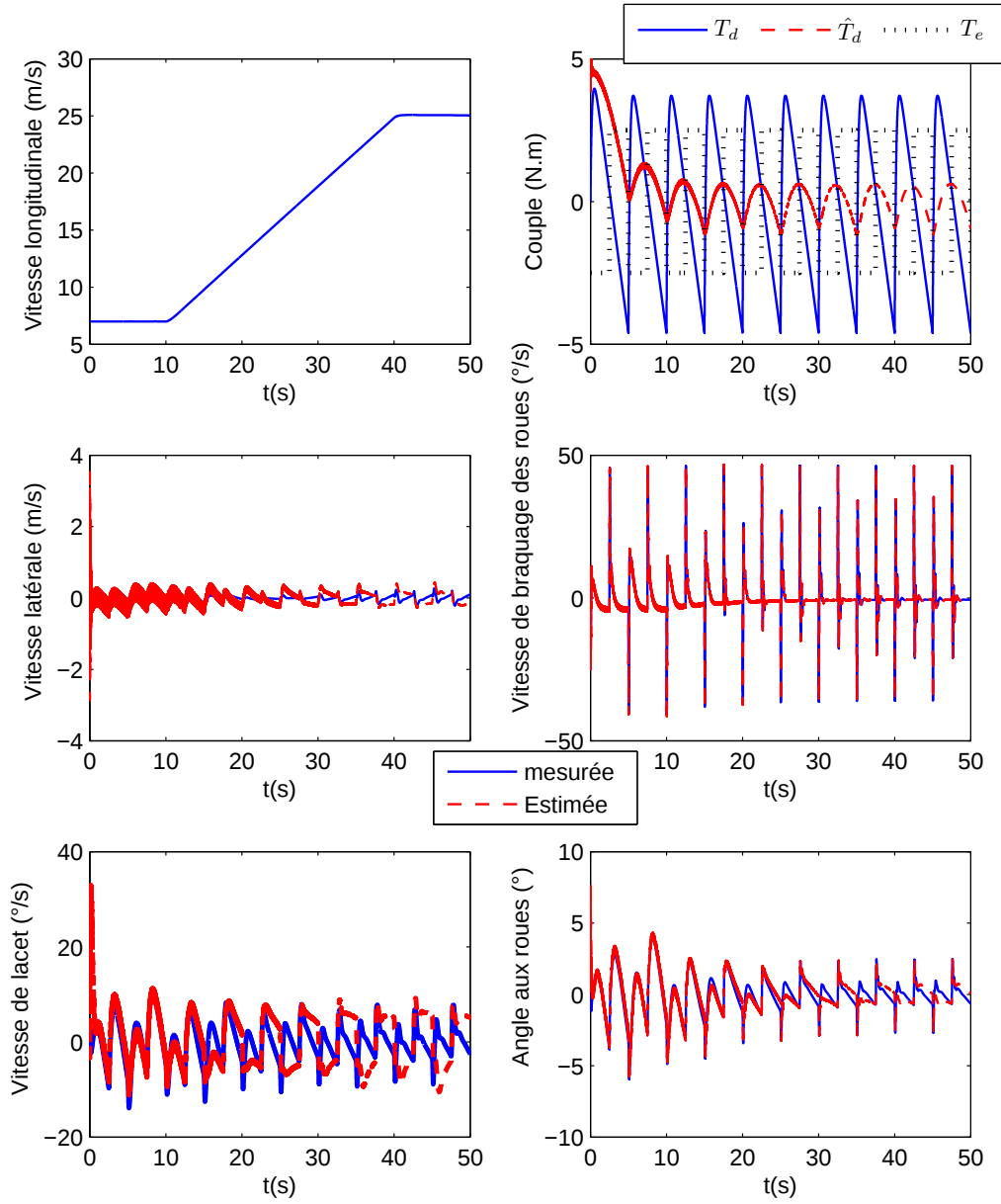
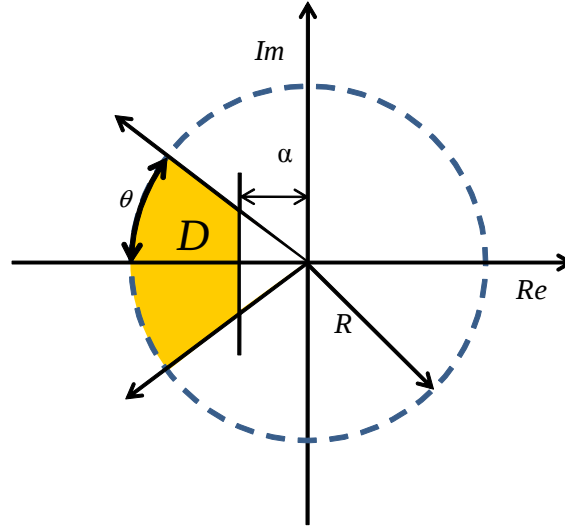


FIGURE 6.2 – Evolution des variables du modèle véhicule et leur estimation par l'observateur obtenu en appliquant le résultat du théorème 6.2

Définition 1 [17] *Le système dynamique (6.12) est dit $\mathcal{D}$ -stable si toutes ses valeurs propres sont situées à l'intérieur de la région $\mathcal{D}$, c'est à dire, $\forall i, \lambda_i \in \mathcal{D}$.*

FIGURE 6.3 – La région $\mathcal{D}(\alpha, R, \theta)$ du plan complexe

Une des régions du plan complexe, à laquelle on s'intéresse particulièrement, est celle formée par l'intersection de la droite parallèle à l'axe des imaginaires située à l'abscisse $-\alpha$ avec le cône partant de l'origine d'angle de 2θ et de sommet l'origine et de cercle d'origine $(0,0)$ et de rayon R (voir la figure 6.3). Cette région est notée par $\mathcal{D}(\alpha, R, \theta)$.

Les valeurs propres du système (6.12) appartiennent à cette région du plan complexe, si les contraintes LMIs suivantes sont respectées [17] :

$\exists X = X^T > 0$ tel que :

$$AX + XA^T < -2\alpha X \quad (6.13)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)(AX + XA^T) & \cos(\theta)(AX - XA^T) \\ -\cos(\theta)(AX - XA^T) & \sin(\theta)(AX + XA^T) \end{bmatrix} < 0 \quad (6.14)$$

$$\begin{bmatrix} -RX & AX \\ XA^T & -RX \end{bmatrix} < 0, \quad \forall i = 1..r \quad (6.15)$$

Si ces contraintes sont vérifiées, alors les valeurs propres de la matrice A du système (6.12) vérifient :

$$\begin{cases} \lambda_i < -2\alpha \\ \frac{\mathcal{I}(\lambda_i)}{\mathcal{R}(\lambda_i)} < \tan(\theta) \\ |\lambda_i| < R, \quad \forall i = 1..r \end{cases} \quad (6.16)$$

Où : $\mathcal{I}(\lambda_i)$ est la composante imaginaire de λ_i et $\mathcal{R}(\lambda_i)$ est sa composante réelle.

Dans la section qui suit, la procédure permettant de confiner les pôles des sous-modèles de l'observateur TS (6.2) dans la région $\mathcal{D}$ sera exposée.

6.2.3 Placement de pôles de l'observateur TS

Pour améliorer les performances de l'observateur TS (6.4), on impose que tous les pôles de ses quatre sous-modèles soient situés à l'intérieur de la région $\mathcal{D}(\alpha, R, \theta)$ du plan complexe, cela est formulé par le théorème suivant :

Théorème 6.3 [17, 57] *Les pôles des sous-modèles de l'observateur TS (6.4) appartiennent à la région $\mathcal{D}(\alpha, R, \theta)$, s'il existe une matrice symétrique positive commune $X = X^T > 0$ telle que les contraintes LMIs suivantes sont vérifiées :*

$$\Upsilon_i < -2\alpha X \quad (6.17)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)\Upsilon_i & \cos(\theta)\Upsilon_i^- \\ -\cos(\theta)\Upsilon_i^- & \sin(\theta)\Upsilon_i \end{bmatrix} < 0 \quad (6.18)$$

$$\begin{bmatrix} -RX & X\check{A}_i - \check{M}_i\check{C} \\ \check{A}_i^T X - \check{C}^T \check{M}_i^T & -RX \end{bmatrix} < 0, \forall i = 1..r \quad (6.19)$$

Avec :

$$\Upsilon_i^- = X\check{A}_i - \check{M}_i\check{C} - (\check{A}_i^T - \check{C}^T \check{M}_i^T) \quad (6.20)$$

La première contrainte impose à l'erreur de l'observateur (6.4) un taux de décroissance d'au minimum égal à α . La deuxième un minimum de damping de $\zeta = \cos(\theta)$ et la troisième impose que toutes les valeurs propres soient à l'intérieur du cercle de centre (0,0) et de rayon R . Le choix de ces paramètres permet aussi de limiter le dépassement maximal (θ), limiter la fréquence de résonance...etc. [17, 57].

6.3 Validation en simulations numériques

On choisissant une région $\mathcal{D}(4.5, 120, 15^\circ)$, on obtient $\gamma = 1.59$. Sur la figure 6.4 est rapporté l'emplacement des pôles des quatre sous-systèmes de l'observateur en boucle fermée. Comme on peut le constater, tous les pôles des quatre sous-systèmes respectent les contraintes imposées et se situent à l'intérieur de la région spécifiée.

Les résultats de simulation, pour les mêmes entrées utilisées dans le §6.2.1.2, sont rapportés sur la figure 6.5 et sur la figure 6.6 est représentée l'erreur d'estimation de l'observateur pour les différentes variables.

Comme on peut le constater, l'observateur permet la reconstruction de l'état du véhicule ainsi que le couple en entrée inconnue avec une bien meilleure précision que celle obtenue par l'observateur sans placement de pôles.

Sur les agrandissements sur le début de la simulation rapportés sur la figure 6.6 ($t \in [0, 0.25]s$), l'erreur d'estimation de variables arrive à converger vers zéro en moins de $0.2s$, ce qui est inférieur à $\frac{1}{4.5}$. Cette période est isolée du reste du temps de simulation pour pouvoir mieux visualiser l'évolution des erreurs d'estimation.

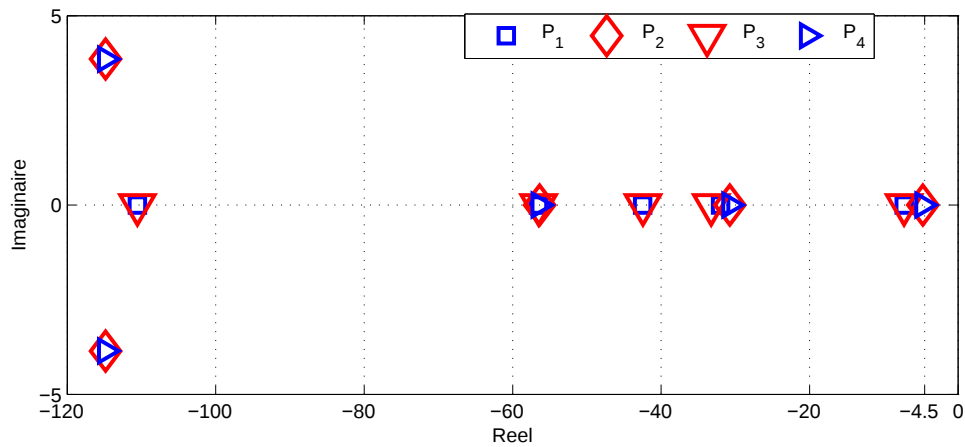


FIGURE 6.4 – Emplacement des pôles des sous-systèmes de l'observateur TS obtenu dans le plan complexe où P_i désigne les pôles du sous-système i

TABLE 6.1 – Statistique sur l'erreur d'estimation pour les différents variables (hors l'état initial)

Erreur (e)	moyenne (10^{-4})	$\max(e)$	écart-type
Couple conducteur ($N.m$)	-79	1.7	0.3565
Vitesse latérale (m/s)	11	0.01	0.028
Vitesse de lacet ($^\circ/s$)	-19	0.827	0.214
Angle de braquage ($^\circ$)	-0.0018	$8.82 \cdot 10^{-4}$	0.005
Vitesse de braquage ($^\circ/s$)	-91	1.395	0.5364

Sur le tableau 6.1 sont rapportées les statistiques sur l'erreur d'estimation sur chaque variable où $\max(|e|)$ représente le maximum de l'erreur en valeur absolue. Ces résultats confirment bien que l'observateur proposé avec le placement de pôles permet la reconstruction de la vitesse latérale du véhicule ainsi que le couple conducteur considéré comme entrée inconnue.

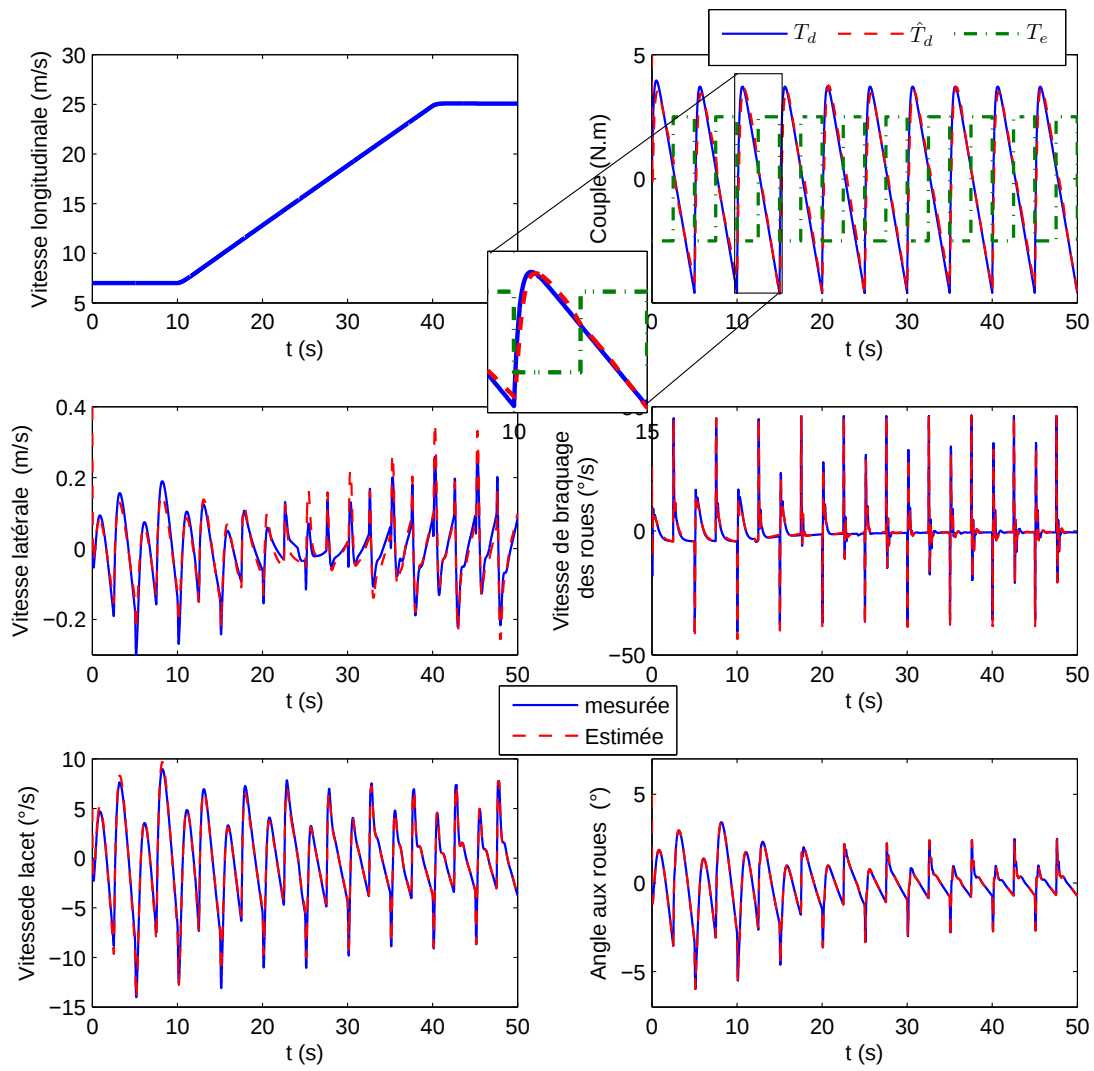


FIGURE 6.5 – Évolution des variables du modèle véhicule et de leurs estimations obtenues en simulations numériques

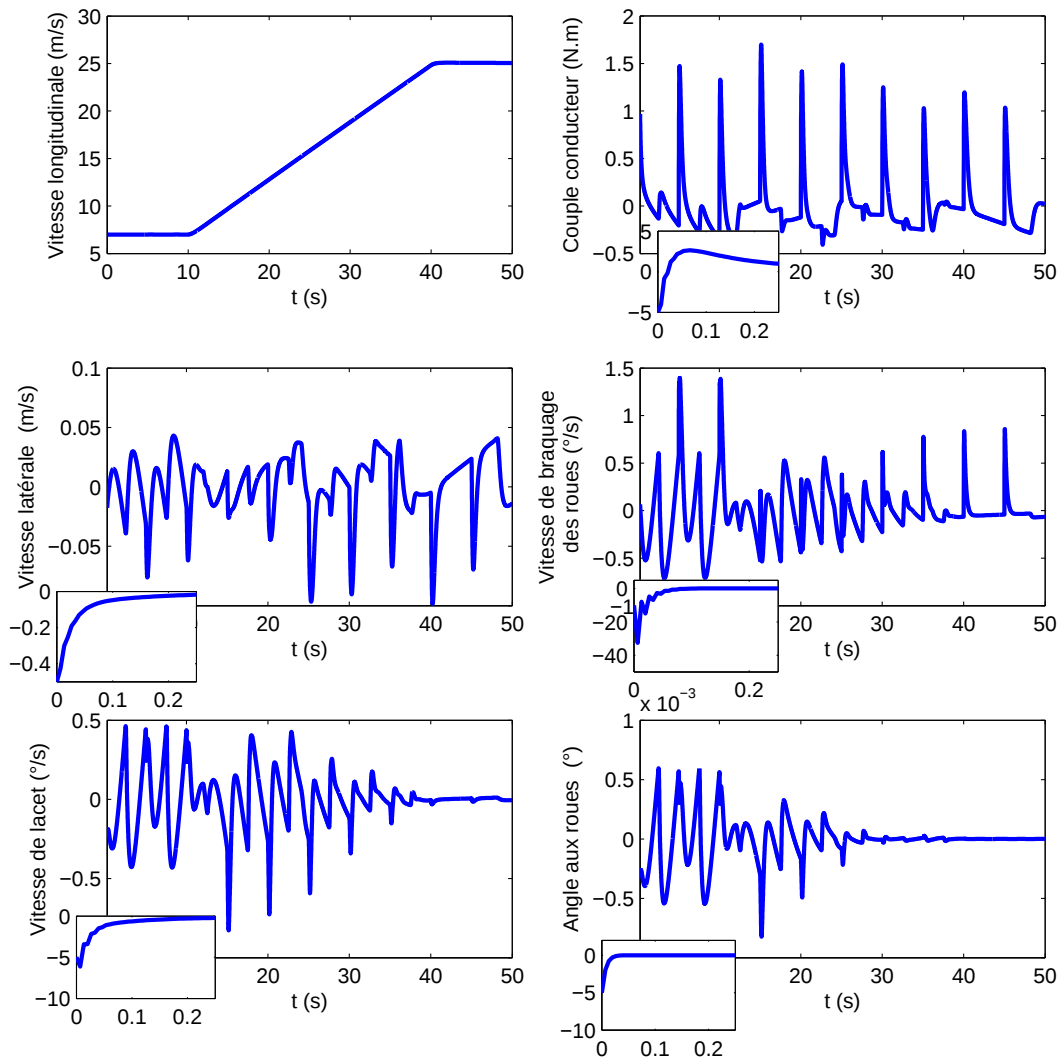


FIGURE 6.6 – Évolution des erreurs d'estimation des variables d'état et du couple de braquage du conducteur obtenues en simulations numériques avec un agrandissement sur la convergence à partir de l'état initial.

6.4 Intégration de l'observateur dans la boucle de commande

Dans cette partie, l'observateur est mis en cascade avec le contrôleur introduit dans le chapitre précédent, et il est évalué sur scénario de conduite exposé dans ledit chapitre.

Remarque 6.4 *L'observateur développé est utilisable directement avec le contrôleur développé dans le chapitre précédent sans besoin d'aucune modification par l'application du principe de séparation (voir [147] pour la démonstration).*

Les résultats de simulation rapportés sur les figures 6.7, 6.8 et 6.9 sont, respectivement, les performances réalisées par la structure observateur-contrôleur, l'évolution des variables d'état du modèle véhicule ainsi que leurs estimations et, en dernier, l'évolution de l'erreur de l'estimation pour chaque variable.

Pour la lisibilité de la figure 6.9, là aussi, la représentation de l'évolution de l'erreur d'estimation à l'état initial est représentée séparément du reste de la durée de la simulation. On peut noter que les performances réalisées par la structure observateur-contrôleur sont identiques à celles réalisées lorsque le contrôleur utilise directement les variables d'état du modèle véhicule puisque l'erreur d'estimation est faible par rapport aux valeurs des variables réelles.

L'erreur maximale sur l'estimation du couple conducteur (hors l'état initial) est de 1.24N.m enregistrée lors de la manœuvre d'évitement d'obstacle et l'erreur sur la vitesse latérale est de 0.07m/s comme le rapporte la figure 6.9. Le temps de convergence des différents variables, à partir de l'état initial, comme dans la simulation en boucle ouverte, est de l'ordre de 0.2s au maximum.

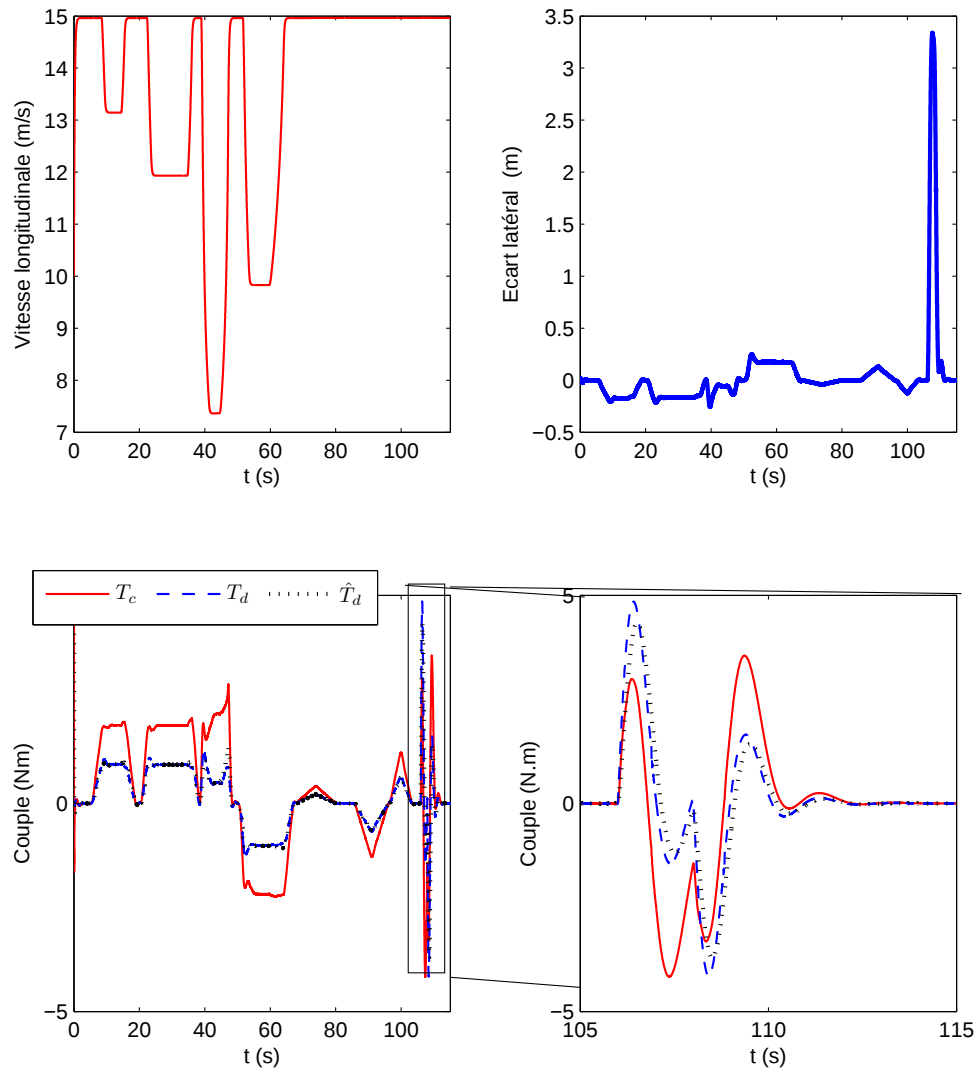


FIGURE 6.7 – Résultats obtenus par la mise en cascade de l'observateur avec E-copilote2.

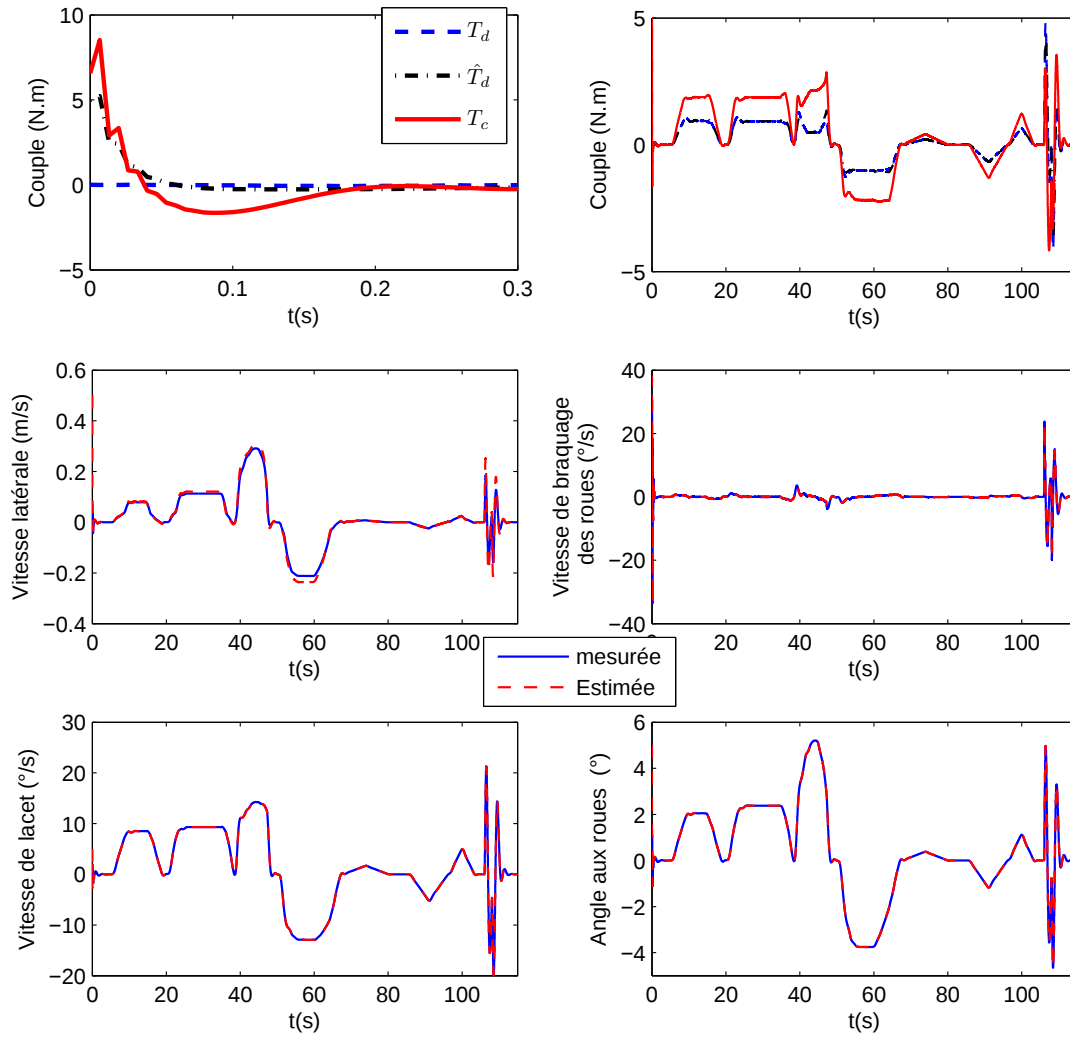


FIGURE 6.8 – Évolution des couples de la commande (T_c), du conducteur (T_d) et son estimation ($\hat{T}_d$) ainsi que des variables du modèle véhicule et de leurs estimations obtenues en simulation d'une conduite partagée avec E-copilote2.

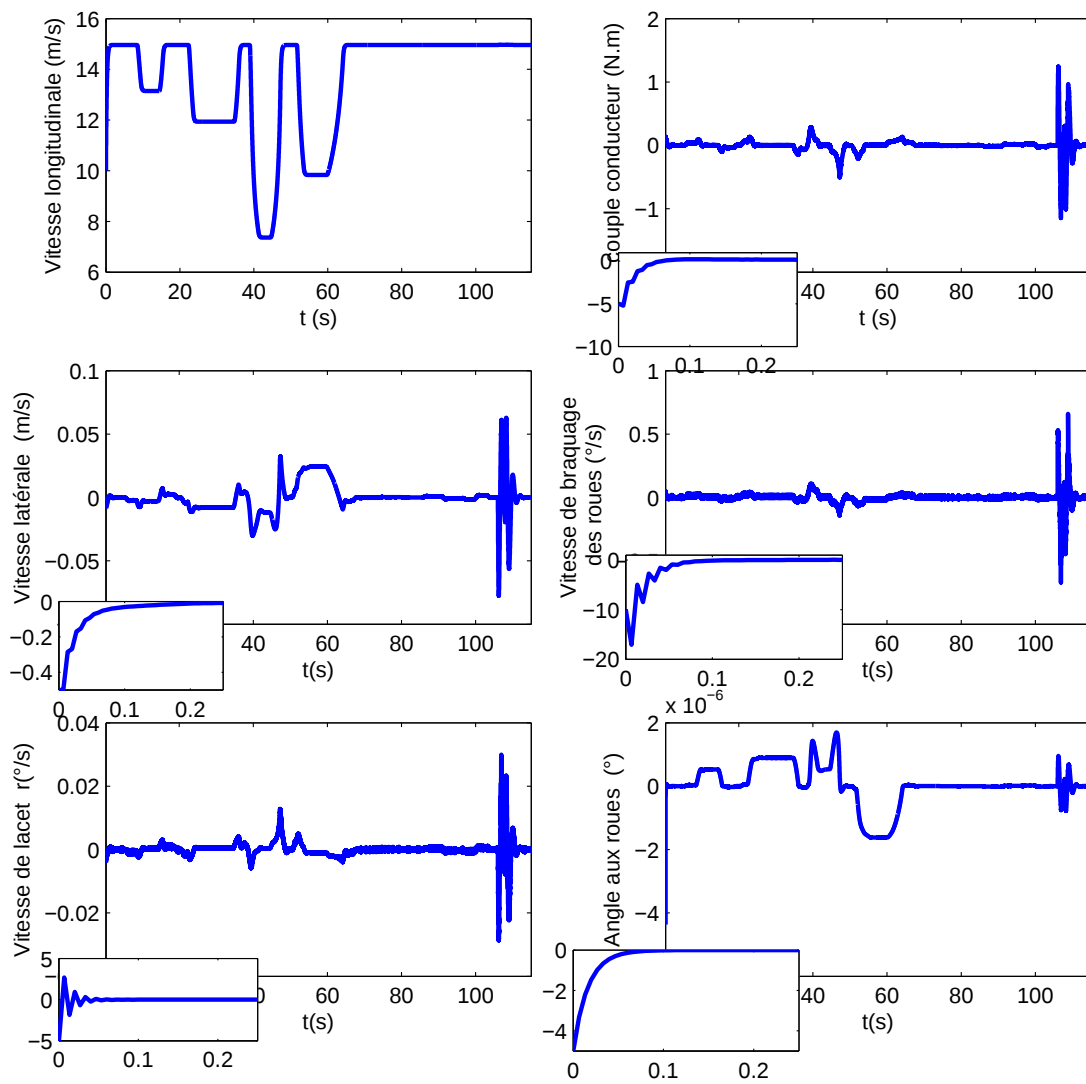


FIGURE 6.9 – Évolution des erreurs d'estimation obtenues en simulation, avec des agrandissements sur la convergence à partir des états initiaux pour une conduite partagée avec E-copilote2.

6.5 Validation de l'observateur sur le simulateur SHERPA-LAMIH

La validation de l'observateur est faite sur des données collectées sur le simulateur de conduite SHERPA pour une conduite, dans un premier temps, avec E-copilote1 puis avec E-copilote2 pour un scénario comprenant une conduite en virages et une manœuvre d'évitement d'obstacle (double changement de voies) par le conducteur. Les résultats obtenus pour la conduite avec E-copilote1 sont rapportés sur la figure 6.10 et l'erreur d'estimation pour chaque variable est rapportée sur la figure 6.11.

Comme on peut le remarquer, l'observateur reproduit avec une bonne précision le couple conducteur ainsi que la vitesse latérale du véhicule.

Le résultat est similaire pour une conduite avec E-copilote2. Comme on peut le voir sur la figure 6.12 l'observateur arrive à suivre l'évolution du couple conducteur ainsi que la vitesse latérale avec un léger dépassement.

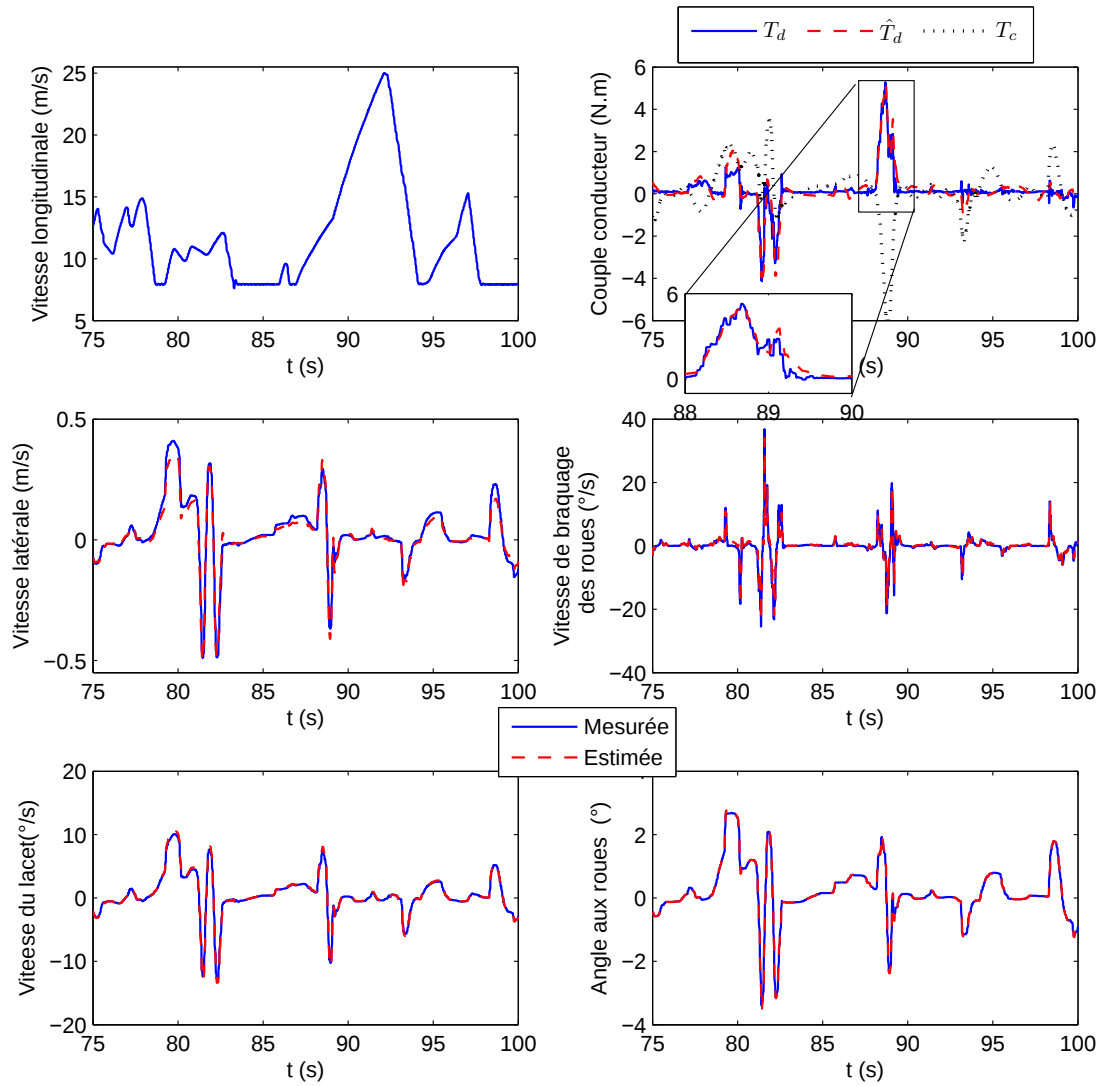


FIGURE 6.10 – Validation de l'observateur sur des données collectées sur le simulateur SHERPA pour une conduite d'un conducteur humain avec E-copilot1

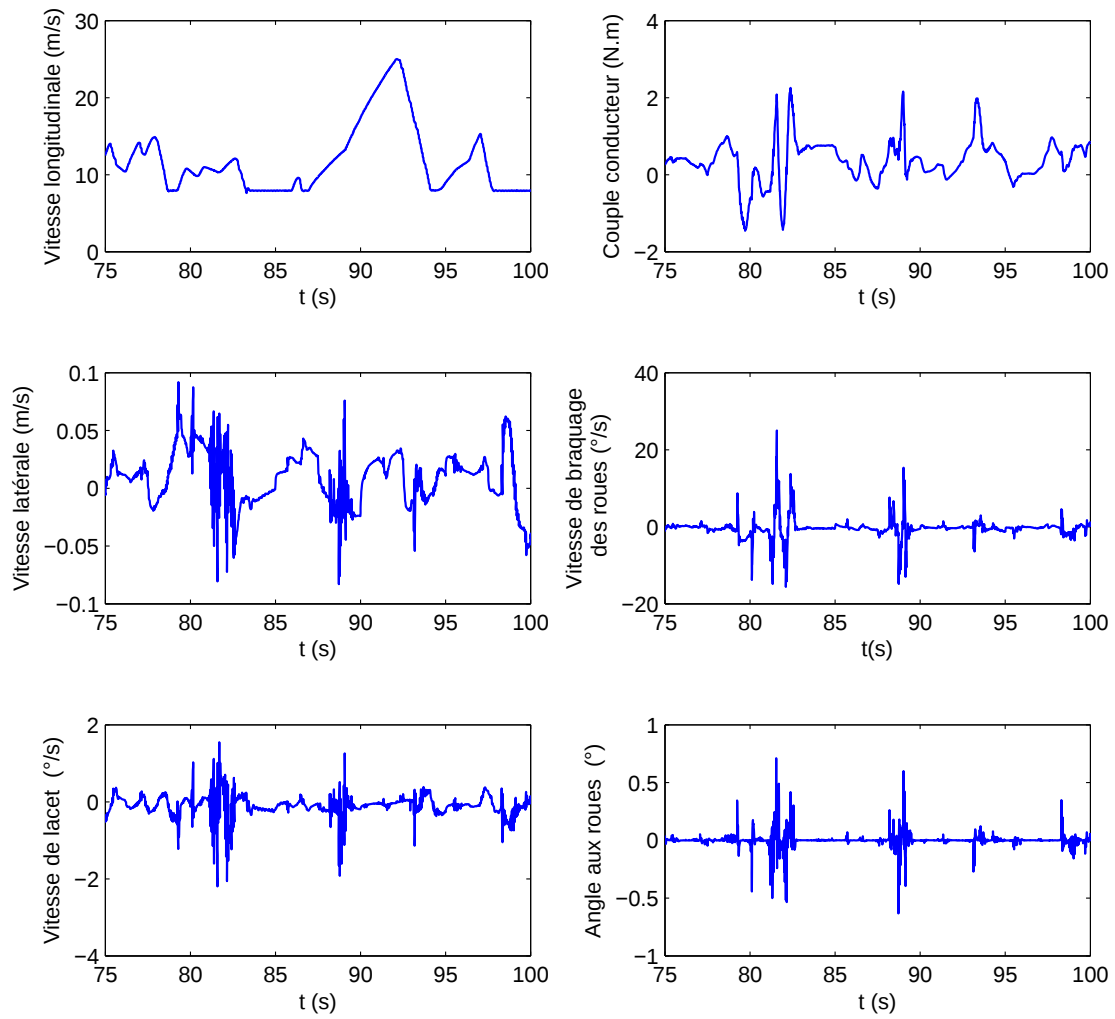


FIGURE 6.11 – Erreur de l'estimation sur les différentes variables pour une validation sur une conduite avec E-copilote1 réalisée sur le simulateur SHERPA

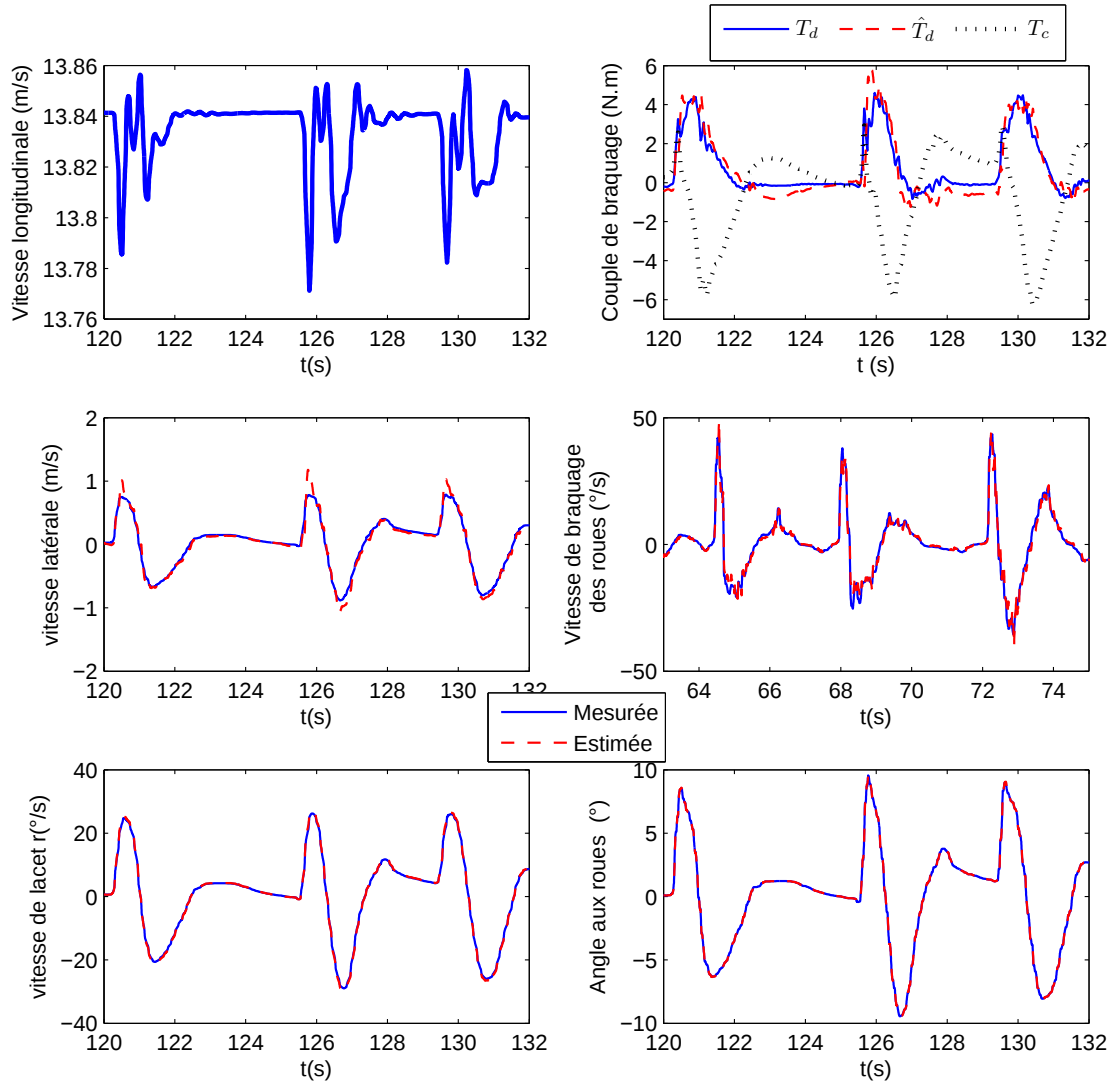


FIGURE 6.12 – Résultats de l'estimation sur le simulateur SHERPA lors d'une série de manœuvres d'évitement d'obstacles lors d'une conduite partagée entre le conducteur et copilote2

6.6 Intégration du système global dans le simulateur SHERPA

[23] L'intégration du contrôleur avec partage haptique de la conduite dans un véhicule réel nécessite de réfléchir d'une part aux différentes façons d'activer/désactiver le contrôleur et d'autre part aux comportements du système lorsqu'on sort de son domaine de fonctionnement (par exemple lorsque les caractéristiques de l'environnement en termes d'informations disponibles ou de conditions de circulation ne sont plus compatibles avec l'utilisation du système). Ceci a été réalisé dans le cadre d'un travail sur la définition des modes de fonctionnement et des conditions d'évolutions entre ces modes (transitions). Le résultat de ce travail a abouti à l'architecture globale du système présentée dans ce paragraphe, architecture qui a été intégrée dans le simulateur de conduite SHERPA. Le graphe présentant cette architecture (modes et transitions) est rapporté sur la figure 6.13. Le système global est composé de plusieurs modes de fonctionnement, intégrés au fur-et-à-mesure dans le cadre de notre participation au projet ABV.

Avant de s'étaler sur la description des différents modes, il est primordial d'éclaircir la notion d'un itinéraire sécurisé.

Définition 2 [22] *Un itinéraire est dit "sécurisé" lorsque l'ensemble des informations nécessaires au fonctionnement du système sont disponibles sur cet itinéraire : cartographie GPS, lignes blanches contrastées,...*

Cela sous-entend que sont donc connus :

- Les lieux où les itinéraires sécurisés débutent ;
- Les lieux où les itinéraires sécurisés se terminent ;
- Les zones où les bandes d'arrêt d'urgence sont disponibles.

Les principaux modes intégrés sont :

Système éteint : L'ensemble des fonctionnalités du système sont désactivées. Cet état est rajouté pour pouvoir étudier les transitions possibles.

Mode manuel : Ce mode est engagé dès que le système est activé, mais aucune assistance n'est donnée au conducteur. Il n'y a que le DM¹ (Driver Monitoring) qui surveille le niveau de vigilance du conducteur et l'alerte si nécessaire (mode réveil).

Mode LONGI : Dans ce mode, en plus de la surveillance de l'état du conducteur, le système prend en charge le contrôle de la vitesse longitudinal du véhicule et l'interdistance au véhicule leader. Le système régule la vitesse du véhicule pour maintenir une vitesse de consigne calculée en prenant en compte : la vitesse limite sur le tronçon de circulation, la vitesse désirée par le conducteur et la vitesse suggérée par le module de planification de trajectoire². Le conducteur a toujours la possibilité de ne pas respecter cette consigne en agissant sur l'accélérateur. Dans ce cas il ressentira un effort de la pédale en réaction (retour haptique), qui est fonction de la différence entre la vitesse de consigne et la vi-

1. Système développé par le partenaire Continental Automotive

2. Développé au LIVIC partenaire du projet ABV

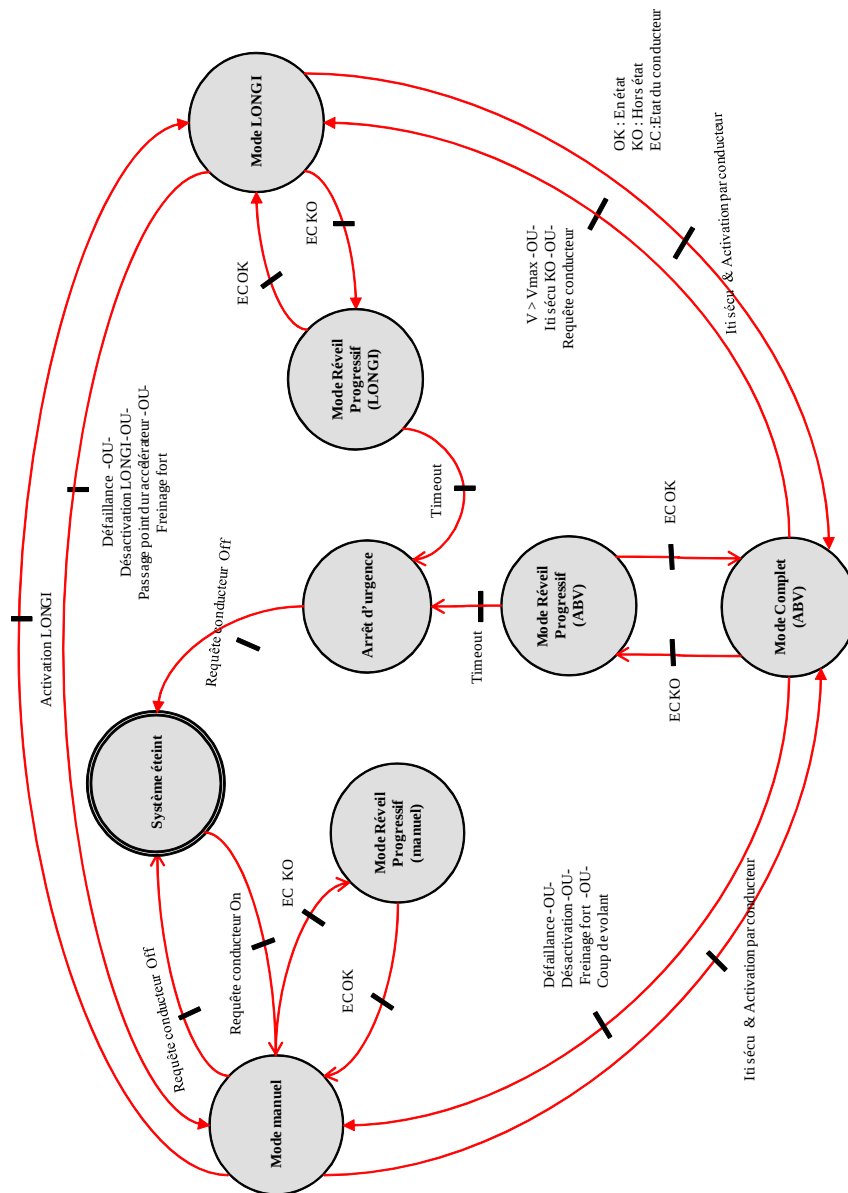


FIGURE 6.13 – Graphe des états et transitions du système global.

tesse du véhicule imposée par le conducteur ; une sorte d'ACC³ interactif via la pédale d'accélération. Cette fonctionnalité a été rendue possible grâce à l'intégration dans le simulateur SHERPA d'une pédale d'accélérateur à retour d'effort développé par Continental Automotive Toulouse (FFP : Force Feedback Pedal). Le système se désengage lorsque le conducteur dépasse le point dur de la pédale signalant la vitesse limite du tronçon.

Mode Complet (ABV) : Dans ce mode, en plus des fonctionnalités listées pour le mode LONGI, le système prend en charge le contrôle latéral du véhicule et donc le contrôle total de la tâche de conduite. Ce mode est activable uniquement sur un itinéraire sécurisé. C'est dans ce mode que s'est concentré le travail du chapitre 5, pour justement gérer les

3. Adaptive Cruise Control

cas de défaillance du système et garantir la possibilité de la reprise en main du véhicule par le conducteur. Un module décisionnel implémentant les bases de la Coopération Haut Niveau (HLC) a été prototypé. Bien que très succinct, ce module a permis de démontrer l'intérêt de permettre au conducteur, via un simple partage haptique de la direction du véhicule, d'influer sur le choix de la trajectoire issue du planificateur qui sera utilisée pour le contrôle.

Ce mécanisme décisionnel prend en compte : l'état des clignotants, l'état du trafic ainsi que celui du conducteur via le couple de braquage qu'il applique sur le volant.

Le conducteur peut indiquer au système son intention de changer de voie de circulation en actionnant son clignotant. Dans ce cas si les conditions de trafic le permettent (pas de véhicule trop proche sur la voie indiquée) le système réalise la manœuvre par lui même. Un conflit se présente dans le cas où le conducteur force la manœuvre que le système "juge" dangereuse.

De façon similaire, le système peut proposer un changement de voie (signalé au conducteur par l'émission d'un bip spécifique l'affichage d'une flèche sur l'interface graphique). Dans ce cas, le conducteur a le choix de laisser faire le système qui exécutera la manœuvre après un temps d'attente de T_{sec} ou, s'il souhaite rester sur sa voie actuelle, il lui suffit de s'opposer au changement de voie par application d'un léger couple de braquage (réglable) empêchant la manœuvre. Ce mode se désengage lorsque la vitesse du véhicule dépasse la vitesse maximale (V_{max}) permise pour son fonctionnement.

Mode réveil progressif : Ce mode fonctionne en permanence avec tous les autres modes hors système éteint, avec des spécificités pour chacun des modes duquel se fait la transition. Comme son nom l'indique, il intègre la fonctionnalité de réveil, lorsqu'on détecte que l'état du conducteur est dégradé (perte de vigilance, fatigue ou somnolence).

Mode Arrêt d'urgence : Ce mode est engagé par le système lorsque la procédure de réveil ne change pas l'état du conducteur (EC) qui est jugé hors état de conduire pour reprendre le contrôle du véhicule au bout d'un certain temps. L'arrêt du véhicule peut se faire soit sur la voie courante si la transition est faite à partir du mode LONGI, soit sur la voie d'arrêt d'urgence (si elle est disponible) si la transition est faite à partir du mode complet.

Les transitions, d'un mode à un autre se font en fonction de plusieurs critères de façon à prendre en compte l'état de chacune des composantes du système global :

- État du conducteur : Se mesure par le biais d'un système de Driver monitoring se basant sur la détection de clignement des yeux et de l'orientation du visage du conducteur. Ce système, développé par Continental Automotive Toulouse, permet d'évaluer le niveau de fatigue/vigilance du conducteur.
- État de l'environnement : Dépend de la qualité de détection des marquages au sol qu'on peut avoir ainsi que de la situation du trafic. Renseigne également sur le type d'itinéraire sur lequel le véhicule circule.
- État du système : Cet état concerne les différents capteurs et les algorithmes utilisés pour

la détection de l'environnement et les contrôleurs et actionneurs permettant l'élaboration et la mise en exécution des actions nécessaires au guidage du véhicule pour chaque mode. Le principe général de ces transitions est : le conducteur peut initier un changement de mode pour impliquer plus le système dans la conduite, par exemple passer du mode manuel au mode LONGI ou du mode LONGI au mode (requiert que les conditions nécessaires pour le bon fonctionnement du mode demandé soient vérifiées), mais le système ne peut le faire dans ce sens. Le système, par contre, peut désengager un mode plus impliqué dans la conduite pour un mode moins impliqué lorsque les conditions de fonctionnement de ce mode ne sont plus valides (absence de marquage au sol, par exemple). L'engagement ou le désengagement d'un mode peut se faire par le conducteur, aussi, à tout moment en utilisant l'interface dédiée ou, en cas de danger, par l'appui fort sur la pédale de frein de frein (pour les modes LONGI et Complet) ou un coup de volant pour que la vitesse du volant dépasse un seuil de sécurité.

6.6.1 Interface graphique du prototype

Une interface graphique permettant de contrôler les changements de mode de fonctionnement du système et fournissant un retour d'information avec une symbolique claire pour la compréhension du fonctionnement du mode engagé a été développée.

Cette interface est accessible via un écran tactile situé sur le tableau de bord du véhicule (figure 6.14).



FIGURE 6.14 – Vue de l'interface sur le tableau de bord.

L'écran d'accueil (figure 6.15) correspond au système éteint (voyant rouge, en bas à droite). L'interface affiche dans la partie basse un bandeau de boutons tactiles permettant de visualiser en même temps et à chaque instant le mode de fonctionnement engagé (affichage du bouton en vert), le ou les modes disponibles et donc pouvant être sélectionnés (affichage en noir sur fond blanc), et enfin les modes non sélectionnables (affichage en gris).

Les informations affichées sur l'interface sont spécifiques pour chacun des modes.

Lors de l'activation du système, il passe directement en mode manuel, et le bouton corres-



FIGURE 6.15 – Ecran d'accueil.

pendant passe au vert. Les informations rapportées dans ce mode sont : la vitesse du véhicule, la vitesse suggérée par le système (carré bleu), la vitesse limite du tronçon ainsi que les états du DM et de la pédale active (voir la figure 6.16).

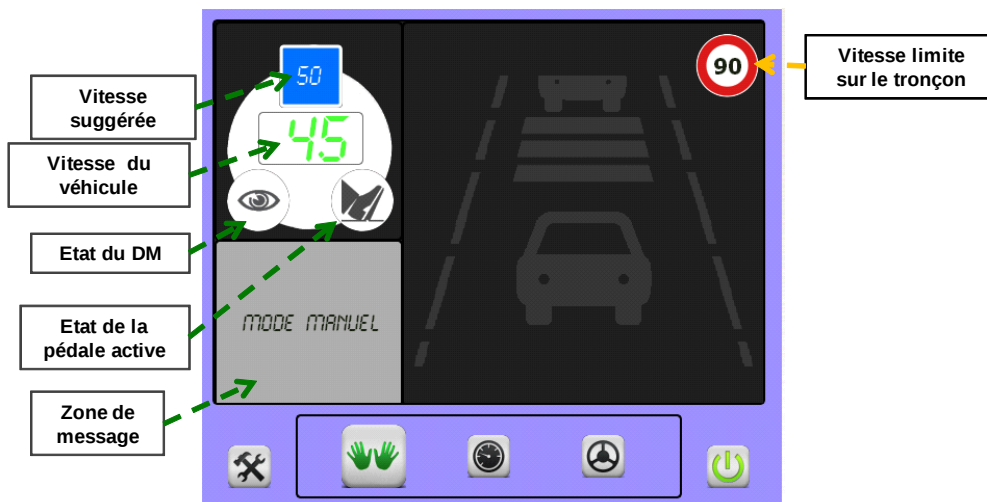


FIGURE 6.16 – Vue de l'interface en mode "Manuel".

En mode LONGI, en plus de l'indication sur le mode engagé (bouton en vert), ce mode est rappelé en clair sur la partie symbolique de la droite de l'IHM en représentant qu'une seule voie. L'information d'interdistance avec le véhicule précédant est affichée à la fois avec un code couleur (une image du véhicule précédant représentée plus ou moins proche) et un certain nombre de "bandes au sol" (voir les figure 6.17 et 6.18).

En mode complet, l'interface reproduit l'environnement entourant le véhicule sujet (en blanc)

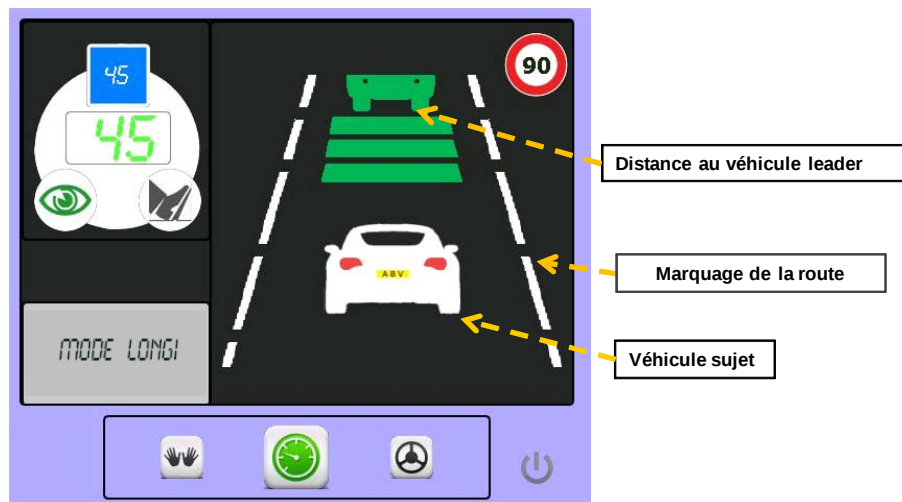


FIGURE 6.17 – Vue de l'interface lorsque le mode "LONGI" est engagé.

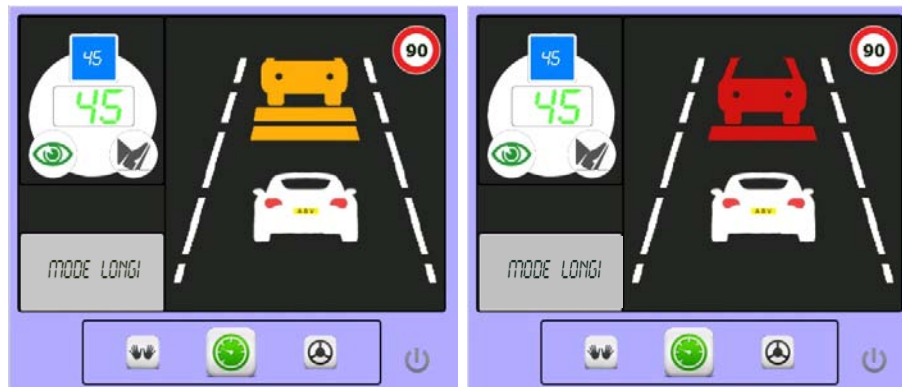


FIGURE 6.18 – Indications sur la distance au véhicule leader affichées en mode "LONGI".

en indiquant les positions des véhicules du trafic avec un code couleur symbolique du risque lié à chacun des véhicules comme rapporté sur la figure 6.19.

Le système indique avec une croix rouge qu'une voie est "inaccessible" et avec une flèche verte le changement de voie qu'il suggère (figure 6.20).

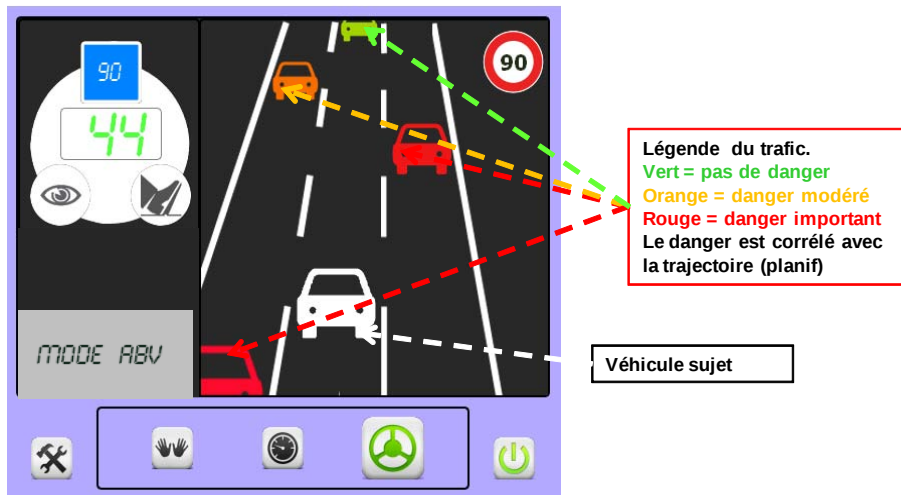


FIGURE 6.19 – Vue de l'interface en mode Complet (ABV).



FIGURE 6.20 – Vue de l'interface en mode Complet (ABV) avec indication sur les voies interdites et des changements suggérés.

6.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des développements spécifiques nécessaires au déploiement du système développé sur un véhicule réel. Il débute par la présentation d'un observateur TS proportionnel multi-Intégral à entrées inconnues permettant la reconstruction de l'état ainsi que des entrées inconnues, tout en assurant une certaine robustesse vis-à-vis des perturbations externes, d'un système représenté par un modèle TS. Cet observateur est rendu nécessaire par le coût très important de certains capteurs (notamment la mesure du couple conducteur) utilisés dans le système. Il est appliqué pour un modèle véhicule réduit ne considérant pas les variables de positionnement sur la route. Les performances de l'observateur sont spécifiées par la technique de placement de pôles permettant de confiner les pôles des sous-modèles de l'observateur TS dans une région $\mathcal{D}$ du plan complexe. La recherche des gains de l'observateur est formulée comme un problème d'optimisation sous forme de contraintes LMIs.

L'observateur a été validé en simulations numériques puis avec des données issues du simulateur

de conduite SHERPA-LAMIH. Dans un premier temps en boucle ouverte, puis mis en cascade avec le contrôleur qui a fait l'objet du chapitre précédent. Les résultats obtenus en simulation ainsi que sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH sont très satisfaisants.

La seconde partie du chapitre aborde, dans un premier temps, le schéma global du démonstrateur développé dans le cadre du projet ABV et implémenté sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH. Par la suite, les fonctionnalités des différents modes ainsi que les conditions de leur engagement/désengagement ont été décrites. Enfin, nous avons exposé l'interface graphique intégrée via laquelle le conducteur sélectionne le mode qu'il souhaite engager et à travers laquelle il perçoit les informations retournées par le système pour chaque mode.

Chapitre 7

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse traite la problématique d'un partage de conduite entre un conducteur humain et un système d'assistance au contrôle du véhicule ou copilote électronique pour la conduite automatisée. Nous nous sommes particulièrement intéressés au contrôle latéral du véhicule dans les cas où les objectifs des deux intervenants ne sont pas les mêmes.

Le premier chapitre a été consacré à un état de l'art des travaux concernant les systèmes d'aide à la conduite en général avec une classification selon leur niveau d'intervention ainsi que leur niveau d'interaction avec le conducteur : les systèmes stabilisant le véhicule, en agissant au bas niveau de la commande et qui "n'interfèrent" pas avec le conducteur. Les systèmes d'alerte permettant de prévoir une situation de risque et d'avertir le conducteur lorsqu'un danger est détecté. Les systèmes actifs agissant ou prenant en charge une partie du guidage du véhicule : longitudinal ou latéral. Cet état de l'art a permis de mettre en évidence la nécessité d'intégrer la problématique de la coopération avec le conducteur dès la conception des systèmes d'assistance pour en améliorer les performances. Dans la suite de ce chapitre, nous avons discuté l'aspect de la coopération en soulevant la problématique du partage du contrôle entre un automate et un être humain en général puis dans le véhicule en particulier. Les principaux travaux, qui se sont penchés sur la question de coopération dans la conduite ont été discutés. En fin de chapitre, nous avons présenté notre conception d'un système d'aide à la conduite coopérant avec le conducteur en mettant en avant deux niveaux hiérarchiques de coopérations : un Bas Niveau de Coopération (BNC) et un Haut Niveau de Coopération (HNC). Le premier concerne la coopération considérant les actions de contrôle du conducteur et du copilote et le second concerne plus leurs "intentions" de guidage.

Le chapitre 2 présente le modèle de véhicule utilisé pour la synthèse de lois de commande et d'observateurs utiles à notre application. Nous avons adopté un modèle à trois degrés de liberté (le modèle bicyclette) positionné sur la route. Ce modèle est suffisant pour reproduire l'essentiel du comportement du véhicule examiné dans notre cas d'application. Le système de direction est modélisé et intégré au modèle véhicule-route, pour permettre une commande en couple de braquage. Cette commande est essentielle pour un partage du contrôle entre le conducteur et l'automate. Pour répondre au besoin de simulation d'une conduite partagée en vue d'analyser

le performances des contrôleurs qui seront développés, un modèle conducteur existant dans la littérature est présenté. En fin du chapitre, le modèle véhicule adopté est validé sur des données collectées sur le simulateur de conduite dynamique SHERPA-LAMIH.

Le chapitre 3 est consacré à la technique de commande adoptée dans ce travail qui est la modélisation floue Takagi-Sugeno (TS). Cette technique est choisie pour permettre de travailler avec le modèle véhicule découplé et de prendre en compte, dans la dynamique latérale du véhicule, la variation de sa vitesse longitudinale. La représentation TS du modèle de la dynamique latérale du véhicule est validée en simulation numérique en comparant ses sorties à celles du modèle développé dans le chapitre 2, puis à des données recueillies sur le simulateur de conduite dynamique SHERPA-LAMIH. Par la suite, un contrôleur TS multi-objectifs est synthétisé en formalisant le problème de maintien de voie en un problème de régulation avec rejet de perturbation, ce qui aboutit à un problème d'optimisation des contraintes LMIs. La résolution de ces LMIs permet d'obtenir le contrôleur latéral recherché. Ce contrôleur garantit un bon suivi de voie pour une vitesse longitudinale variable et présente une bonne robustesse vis-à-vis des perturbations externes. La validation de ce contrôleur est réalisée en simulation numérique ainsi que sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH.

Dans le chapitre 4 la nécessité de traiter spécifiquement le partage du contrôle latéral du véhicule est mise en évidence en simulation dans un premier temps. Cela est fait en mettant dans la boucle un conducteur et le contrôleur de maintien de voie développé dans le chapitre 3. La situation testée est un évitement d'obstacle non détecté par le copilote. Le résultat de la simulation, qui se confirme dans les validations sur SHERPA, démontre qu'il est primordial de considérer le conducteur dans la boucle de contrôle et lui permettre d'intervenir sans qu'il soit rejeté par le copilote.

N'étant pas en mesure de connaître les intentions du conducteur, les solutions proposées considèrent le couple de braquage appliqué par le conducteur pour réaliser un partage haptique du contrôle latéral et résoudre les situations de conflit. Comme première solution, nous avons procédé à une pondération du couple de braquage issu du contrôleur en fonction de celui appliqué par le conducteur. Cette approche a permis de réduire l'intensité du conflit entre le conducteur et le copilote. Il n'en reste pas moins que le conducteur est toujours contrôlé par le copilote dès qu'il essaie de s'écarter de la trajectoire de référence du copilote (centre de la voie cible). La deuxième approche proposée résout ce problème en intégrant le partage du contrôle à la conception du contrôleur par adjonction d'un modèle conducteur au modèle véhicule-route. Les résultats obtenus en simulations ont montrés l'apport considérable constitué par l'ajout du modèle conducteur pour le partage haptique de la conduite.

Pour confirmer les résultats obtenus en simulations numériques, toutes les stratégies testées sont validées en simulations interactives sur le simulateur de conduite SHERPA avec un conducteur humain. Les essais réalisés confirment les conclusions tirées des simulations numériques.

A la fin du chapitre, nous avons montré l'intérêt d'étendre le mécanisme de partage au choix de la trajectoire issue de la planification (HNC). Un premier mécanisme décisionnel permettant le

choix entre plusieurs trajectoires possibles a été développé. Nous avons montré, en simulations numériques, que l'utilisation de la différence des couples (conducteur et copilote) pouvait être utilisée à cette fin. En simulations interactives, des critères supplémentaires ont pu être utilisés. Dans une perspective d'intégration de l'approche proposée sur véhicule réel, le chapitre 5 a été consacré au développement d'un observateur TS à entrée inconnue permettant d'estimer le vecteur d'état du véhicule ainsi que le couple appliqué par le conducteur. Pour la synthèse de l'observateur, dans un premier temps, uniquement une contrainte de rejet de perturbations est considérée pour formaliser les LMI. Dans ce cas, l'observateur obtenu converge très lentement et n'arrive pas à suivre les variations des variables que l'on souhaite estimer. Un placement de pôles dans une région D-stable du plan complexe est alors réalisé afin d'augmenter les performances de l'observateur (temps de convergence, dépassement...). Les résultats obtenus en simulation numérique ainsi que les validations sur des données issues du simulateur de conduite confirment l'efficacité de l'observateur pour l'estimation et du vecteur d'état du véhicule et du couple appliqué par le conducteur considéré comme l'entrée inconnue.

La fin du chapitre est consacrée à la présentation du démonstrateur développé dans le simulateur de conduite SHERPA. Les différentes fonctionnalités intégrées ainsi que l'interface graphique implémentée sont décrites.

Perspectives

Comme perspectives à ce travail, il est intéressant, dans un futur proche, de réaliser une campagne de tests pour les différentes stratégies présentées avec un panel de sujets pour pouvoir valider nos premiers résultats. A plus long terme, une campagne de tests sur véhicule réel est indispensable pour notamment étudier le comportement des conducteurs par rapport au système (construction de la confiance, prise de risque, négligence...).

Dans ce travail, nous avons supposé que le conducteur est en "pleine possession de ses moyens" et que la défaillance est plutôt plus probable du côté du copilote. Il est aussi tout à fait intéressant de considérer le cas où la défaillance concerne le conducteur, par exemple présence d'un véhicule dans l'angle mort que le système a détecté alors que le conducteur veut réaliser un déboîtement. Nous nous sommes concentrés sur l'aspect sécuritaire dans le partage du contrôle latéral du véhicule, il n'est pas moins intéressant de considérer le partage dans les situations de conduite normales où le conducteur veut participer dans le processus de conduite sans avoir la sensation que le système fait tout à sa place, comme ce que nous avons obtenu durant les premières phases de conduite dans le chapitre 4.

L'interface graphique développée utilise des techniques classiques (écran tactile situé au tableau de bord). Dans des situations de risque où le conducteur est concentré sur la route, ou lorsqu'une reprise en main par le conducteur est nécessaire, l'accès aux informations affichées est très difficile. Une perspective est d'étudier l'apport potentiel de techniques telles que la réalité augmentée via par exemple, les système d'affichage tête haute pour faciliter l'accès aux

informations (risque détecté, trajectoire possible, intentions du contrôleur ...) ou favoriser la reconstruction de la conscience de la situation lors d'un retour au mode manuel en situation d'urgence.

Une intégration du système global sur un véhicule réel pour confirmer les résultats obtenus par le contrôleur ainsi que ceux de l'observateur est souhaitable.

Nous avons supposé, aussi, pour la modélisation TS, que la vitesse longitudinale du véhicule est disponible, ce qui n'est pas forcément le cas pour une application réelle, donc il serait intéressant de la considérer non mesurable.

Une réduction de l'ordre de la représentation TS est également possible, pour réduire le conservatisme, puisque les non linéarités, considérées dans le mode latéral du véhicule, sont dépendantes.

Bibliographie

- [1] C. Blaschke a, F. Breyer, B. Färber, J. Freyer, and R. Limbacher. Driver distraction based lane-keeping assistance. *Transportation Research Part F*, 12 :288–299, 2009. [18](#)
- [2] DA Abbink and M. Mulder. Neuromuscular analysis as a guideline in designing shared control. *Advances in Haptics*, 109 :499–516, 2010. [ix](#), [26](#), [27](#), [99](#)
- [3] David A Abbink, Mark Mulder, and Erwin R Boer. Haptic shared control : smoothly shifting control authority ? *Cognition, Technology & Work*, 14(1) :19–28, 2012. [26](#)
- [4] L. Adams. Review of the Literature on Obstacle Avoidance Maneuvers : Braking versus Steering. Tech. Report UMTRI- 86649, Research Information and Publication Center, University of Michigan Transportation Research Institute, 1994. [17](#)
- [5] Bertrand Alain. CAR AND DRIVER. [http ://www.caranddriver.com/](http://www.caranddriver.com/), 2013. [ix](#), [11](#)
- [6] Lisanne Bainbridge. Ironies of automation. *Automatica*, 19(6) :775–779, 1983. [20](#)
- [7] P.H. Batavia. *Driver-adaptive lane departure warning systems*. PhD thesis, Citeseer, 1999. [14](#)
- [8] Thorsten Brandt. *A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance*. PhD thesis, University of Paderborn, 2007. [ix](#), [28](#), [29](#)
- [9] Thorsten Brandt, Thomas Sattel, and Michael BÖhm. Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lane-keeping and collision avoidance systems. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 582–587, Istanbul, Turkey, juin 2007. [28](#)
- [10] Yong-Yan Cao and Paul M Frank. Analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via fuzzy control approach. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 8(2) :200–211, 2000. [60](#)
- [11] V. Cerone, M. Milanese, and D. Regruto. Combined Automatic Lane-Keeping and Driver’s Steering Through a 2-DOF Control Strategy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(1) :135–142, 2009. [ix](#), [25](#)
- [12] Ahmed Chaibet. *Contrôle Latéral et Longitudinal pour le Suivi de Véhicule*. PhD thesis, University of Evry-Val-d’Essonne, June 2006. [vii](#), [19](#), [34](#), [43](#), [157](#)
- [13] B.R. Chang, H.F. Tsai, and C.P. Young. Intelligent data fusion system for predicting vehicle collision warning using vision/GPS sensing. *Expert Systems with Applications*, 37(3) :2439–2450, 2010. [10](#)

- [14] Bor-Sen Chen, Chung-Shi Tseng, and Huey-Jian Uang. Mixed H_2/H_∞ fuzzy output feedback control design for nonlinear dynamic systems : an LMI approach. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 8(3) :249–265, 2000. 60
- [15] Liang-Kuang Chen and Bo-Jun Shieh. Coordination of the Authority between the Vehicle Driver and a Steering Assist Controller. *WSEAS Transactions On Systems And Control*, 3 :553–564, 2008. ix, 26, 27, 28, 88
- [16] M. Chen, T. Jochem, and D. Pomerleau. AURORA : A Vision-Based Roadway Departure Warning System. In *Proceedings, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : human robot interaction and cooperative robots, August 5-9, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*, page 243, 1995. 14
- [17] Mahmoud Chilali and Pascal Gahinet. H_∞ design with pole placement constraints : an LMI approach. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 41(3) :358–367, 1996. 118, 119, 120
- [18] PSA Paugeot Citroën. AFIL :Alerte de franchissement involontaire de ligne. <http://www.citroen.ch/fr/technologies/>, 2013. ix, 16
- [19] Chris W Clegg, Melanie Older Gray, and Patrick E Waterson. The 'Charge of the Byte Brigade' and a socio-technical response. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(2) :235–251, 2000. 20
- [20] HAVEit Consortium. Livrable D33.3 : validation of preliminary design by simulation. Livrable, Livrable : <http://www.haveit-eu.org>, 2011. ix, 22, 23
- [21] Julien Coudon. *Algorithmes de commande pour le pilotage d'une direction découplée*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2007. 10
- [22] M. Cour, S. Debernard, JC. Popieul, C. Sentouh, P. Simon, and B. Soualmi. Livrable L4200 Spécifications de la Coopération Homme-Machine. Livrable, Projet ANR-09-VTT-01, 2011. 132
- [23] M. Cour, S. Debernard, JC. Popieul, C. Sentouh, P. Simon, and B. Soualmi. Livrable L4500 Synthèse des enseignements des essais sur simulateur. Livrable, Projet ANR-09-VTT-01, 2013. 132
- [24] CAEMAX Datasheet. *Steering Effort Sensor CLS for Automobiles and Trucks*. CAEMAX Technologie GmbH, Bunzlauer Platz 1, D-80992 München. 53
- [25] Serge Debernard. Coopération homme-machine et répartition dynamique des tâches- Application au contrôle de trafic aérien. Habilitation à diriger des recherches 06/03, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2006. 20
- [26] Torsten Dittel and Hans-Jörg Aryus. How to "Survive" a safety case according to ISO 26262. In *Computer Safety, Reliability, and Security*, pages 97–111. Springer, 2010. ix, 29, 30
- [27] Edmund Donges. A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 20(6) :691–707, 1978. 47

- [28] M. Doumiati, O. Sename, J. Martinez, L. Dugard, and C. Poussot-Vassal. Gain-scheduled LPV/ H_∞ controller based on direct yaw moment and active steering for vehicle handling improvements. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, United States, 2010. 13
- [29] Moustapha Doumiati, Olivier Sename, Luc Dugard, John-Jairo Martinez-Molina, Peter Gaspar, and Zoltan Szabo. Integrated vehicle dynamics control via coordination of active front steering and rear braking. *European Journal of Control*, 2013. 13
- [30] J. Ehrlich, M. Marchi, P. Jarri, L. Salesse, D. Guichon, D. Dominois, and C. Leverger. LAVIA : the French ISA project : main issues and first results on technical tests. In *Proceedings, 10th World Congress on ITS, Madrid*, 2003. 10
- [31] A. El Hajjaji and S. Bentalba. Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 43(4) :203–213, 2003. 62
- [32] A El Hajjaji, A Ciocan, and D Hamad. Four wheel steering control by fuzzy approach. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 41(2-3) :141–156, 2005. 60
- [33] Ahmed El Hajjaji and Said Bentalba. Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 43(4) :203–213, 2003. 60
- [34] Nicoleta Minoiu Enache. *Assistance préventive à la sortie de voie*. PhD thesis, Université d'Évry-Val-d'Essonne, 2008. ix, 24, 25, 34
- [35] FO Flemisch, Johann Kelsch, Christian Löper, Anna Schieben, Julian Schindler, and Matthias Heesen. Cooperative control and active interfaces for vehicle assistance and automation. In *FISITA, World automotive Congress*, Munich, Sep. 2008. 12
- [36] Frank Flemisch, Matthias Heesen, Johann Kelsch, Julian Schindler, Carsten Preusche, and Joerg Dittrich. Shared and cooperative movement control of intelligent technical systems : Sketch of the design space of haptic-multimodal coupling between operator, co-automation, base system and environment. In *Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, volume 11, pages 304–309, 2010. ix, 31, 102
- [37] Frank O. Flemisch, Catherine A. Adams, Sheila R. Conway, Ken H. Goodrich, Michael T. Palmer, Schutte, and Paul C. The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction. Technical memorandum, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199, dec 2003. 30
- [38] T. Fraichard, M. Hassoun, and N. Lefort. An electronic co-pilot : the Pro-Lab II demonstrator. In *Proceedings of the 3rd Prometheus Collision Avoidance Workshop*, pages 230–237. Citeseer, 1992. 18
- [39] Pascal Gahinet, Arkadii Nemirovskii, Alan J Laub, and Mahmoud Chilali. The LMI control toolbox. In *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, 1994.*, volume 3, pages 2038–2041. IEEE, 1994. 60
- [40] Venture Gentiane. *Identification des parametres dynamiques d'une voiture*. PhD thesis, École Centrale de Nantes, novembre 2003. 50

- [41] J. Christian Gerdes and Eric J. Rossetter. A unified approach to driver assistance systems based on artificial potential fields. In *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 1–8, Nashville, TN, USA, Novembre 1999. 18
- [42] Barry P Goettl. Attention, workload, and automation. In *Automation and systems issues in air traffic control*, pages 293–297. Springer, 1991. 20
- [43] M.A. Goodrich and E.R. Boer. Model-based human-centered task automation : A case study in ACC system design. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 33(3) :325–336, 2003. 17
- [44] Michael A. Goodrich and Erwin R. Boer. Designing Human-Centered Automation : Tradeoffs in Collision Avoidance System Design. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 1(1) :40–54, march 2000. ix, 21, 24
- [45] Paul Griffiths and R. Brent Gillespie. Shared Control Between Human and Machine : Haptic Display of Automation During Manual Control of Vehicle Heading. In IEEE Computer science, editor, *Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 358–366, 2004. 25
- [46] Paul Griffiths and R. Brent Gillespie. Sharing Control Between Human and Automation Using Haptic Interface : Primary and Secondary Task Performance Benefits. *human factor and ergonomic society*, 2005. 25
- [47] T.M Guerra, A. Kruszewski, L. Vermeiren, and H. Tirmant. Conditions of output stabilization for nonlinear models in the Takagi–Sugeno’s form. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9) :1248–1259, 2006. 60
- [48] T.M. Guerra and L. Vermeiren. Control laws for Takagi-Sugeno fuzzy models. *Fuzzy Sets and Systems*, 120(1) :95–108, 2001. 62
- [49] T.M. Guerra and L. Vermeiren. LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno’s form. *Automatica*, 40(5) :823–829, 2004. 62
- [50] U. Handmann, T. Kalinke, C. Tzomakas, M. Werner, and W.v. Seelen. An image processing system for driver assistance. *Image and Vision Computing*, 18 :367–376, 2000. 10
- [51] M. Hassoun, C. Laugier, D. Ramamonjisoa, and N. Lefort. Towards safe driving in trafic situation by using an electronic co-pilot. In *Proc. of the IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Tokyo, Japan, July*, pages 14–16. Citeseer, 1993. 18
- [52] RA Hess and A. Modjtahedzadeh. A control theoretic model of driver steering behavior. *IEEE Control Systems Magazine*, 10(5) :3–8, 1990. 47
- [53] Jean-Michel Hoc. Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4) :509 – 540, 2001. 21
- [54] Jean-Michel Hoc, Mark S Young, and Jean-Marc Blosseville. Cooperation between drivers and automation : implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(2) :135–160, 2009. 21

- [55] JM Hoc, M El Jaafari, JF Forzy, J Navarro, and F Mars. User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In *Proceedings of European conference on human centred design for intelligent transport systems*, page 311, 2008. [14](#)
- [56] Erik Hollnagel. Prolegomenon to cognitive task design. *Handbook of cognitive task design*, pages 3–15, 2003. [21](#)
- [57] Sung-Kyung Hong and Reza Langari. An LMI- H_∞ fuzzy control system design with TS framework. *Information sciences*, 123(3) :163–179, 2000. [120](#)
- [58] Dalil Ichalal. *Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi-Sugeno*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. [115](#)
- [59] Dalil Ichalal, Benoit Marx, Jose Ragot, and Didier Maquin. Simultaneous state and unknown inputs estimation with PI and PMI observers for Takagi Sugeno model with unmeasurable premise variables. In *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on*, pages 353–358. IEEE, 2009. [112](#), [113](#)
- [60] R. Isermann. Mechatronic systems–innovative products with embedded control. *Control Engineering Practice*, 16(1) :14–29, 2008. [ix](#), [9](#), [10](#), [11](#)
- [61] Rolf Isermann, Roman Mannale, and Ken Schmitt. Collision-avoidance systems PRO-RETA : Situation analysis and intervention control. *Control Engineering Practice*, 20(11) :1236 –1246, 2012. [12](#)
- [62] Rudolph Emil Kalman et al. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1) :35–45, 1960. [112](#)
- [63] Shih-Wei Kau, Hung-Jen Lee, Ching-Mao Yang, Ching-Hsiang Lee, Lin Hong, and Chun-Hsiung Fang. Robust H_∞ fuzzy static output feedback control of TS fuzzy systems with parametric uncertainties. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(2) :135–146, 2007. [60](#)
- [64] Arne Kesting, Martin Treiber, Martin Schönhof, and Dirk Helbing. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 16(6) :668 – 683, 2008. [17](#)
- [65] Oussama Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1) :90–98, 1986. [18](#)
- [66] K. Kluge and C. Thorpe. Representation and recovery of road geometry in YARF. In *Intelligent Vehicles' 92 Symposium., Proceedings of the*, pages 114–119. IEEE, 1992. [10](#)
- [67] Damien Koenig. Unknown input proportional multiple-integral observer design for linear descriptor systems : application to state and fault estimation. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 50(2) :212–217, 2005. [112](#), [113](#)
- [68] C. Kreucher, S. Lakshmanan, and K. Kluge. A driver warning system based on the LOIS lane detection algorithm. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, pages 17–22. Citeseer, 1998. [14](#)

- [69] Salim Labiod, Mohamed Seghir Boucherit, and Thierry Marie Guerra. Adaptive fuzzy control of a class of MIMO nonlinear systems. *Fuzzy sets and systems*, 151(1) :59–77, 2005. [60](#)
- [70] Salim Labiod and Thierry Marie Guerra. Adaptive fuzzy control of a class of SISO nonaffine nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(10) :1126–1137, 2007. [60](#)
- [71] Michael Land and Julia Horwood. Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377 :339–340, 1995. [47](#)
- [72] Jean-Philippe Lauffenburger. *Contribution à la surveillance temps-réel du système conducteur - véhicule - environnement : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite*. PhD thesis, Université de Haute Alsace, 2002. [ix](#), [8](#), [9](#), [28](#)
- [73] Claude Laurgeau. *Le siècle de la voiture intelligente*. Presses des MINES, 2009. [1](#), [20](#)
- [74] Joon Woong Lee. A Machine Vision System for Lane-Departure Detection. *Computer Vision and Image Understanding*, 86(1) :52 – 78, 2002. [10](#), [14](#)
- [75] Zs Lendek, J Lauber, TM Guerra, R Babuška, and B De Schutter. Adaptive observers for TS fuzzy systems with unknown polynomial inputs. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(15) :2043–2065, 2010. [112](#), [113](#)
- [76] Chunguang Li, Houjun Wang, and Xiaofeng Liao. Delay-dependent robust stability of uncertain fuzzy systems with time-varying delays. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 151(4) :417–421, 2004. [60](#)
- [77] J. Li, H.O. Wang, D. Niemann, and K. Tanaka. Dynamic parallel distributed compensation for Takagi-Sugeno fuzzy systems : An LMI approach. *Information sciences*, 123(3-4) :201–221, 2000. [61](#)
- [78] David Fernández Llorca, Vicente Milanés, Ignacio Parra Alonso, Miguel Gavilán, Iván García Daza, Joshué Pérez, and Miguel A Sotelo. Autonomous pedestrian collision avoidance using a fuzzy steering controller. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(2) :390–401, 2011. [60](#)
- [79] Saleh Louay. *contrôle latéral partagé d'un véhicule automobile*. PhD thesis, École Centrale de Nantes, Avril 2012. [27](#), [88](#)
- [80] David G Luenberger. Observing the state of a linear system. *Military Electronics, IEEE Transactions on*, 8(2) :74–80, 1964. [112](#)
- [81] Ebrahim H Mamdani and Sedrak Assilian. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1) :1–13, 1975. [59](#)
- [82] S. Mammar and D. Koenig. Vehicle handling improvement by active steering. *Vehicle System Dynamics*, 38(3) :211–242, 2002. [37](#)
- [83] S. Mammar, P. Martinet, S. Glaser, M. Netto, L. Nouvelière, and B. Thuilot. Méthodes de l'automatique pour l'assistance et l'automatisation de la conduite automobile. In *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Guidel, Morbihan, 5-7 octobre 2005. JNRR'05. [21](#)

- [84] B. Mansouri, N. Manamanni, K. Guelton, A. Kruszewski, and T.M. Guerra. Output feedback LMI tracking control conditions with H_∞ criterion for uncertain and disturbed T-S models. *Information Sciences*, 179(4) :446–457, 2009. [60](#)
- [85] JOHN MARKOFF. Guided by Computers and Sensors, a Smooth Ride at 60 Miles Per Hour. *The New York Times*, page A18, October 10, 2010. [30](#)
- [86] J.J. Martinez and C. Canudas-de Wit. A safe longitudinal control for adaptive cruise control and stop-and-go scenarios. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 15(2) :246–258, 2007. [17](#)
- [87] R. Marzotto, P. Zoratti, D. Bagni, A. Colombari, and V. Murino. A real-time versatile roadway path extraction and tracking on an FPGA platform. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010. [10](#)
- [88] J.C. McCall and M.M. Trivedi. Video-based lane estimation and tracking for driver assistance : survey, system, and evaluation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7(1) :20–37, 2006. [44](#)
- [89] JS Meditch and GH Hostetter. Observers for systems with unknown and inaccessible inputs. In *Decision and Control including the 12th Symposium on Adaptive Processes, 1973 IEEE Conference on*, volume 12, pages 120–124. IEEE, 1973. [112](#)
- [90] John A Michon. A critical view of driver behavior models : what do we know, what should we do? *Human behavior and traffic safety*, pages 485–520, 1985. [ix](#), [8](#)
- [91] John Jairo Martinez Molina. *Commande de l'inter-distance entre deux véhicules*. PhD thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, 2005. [17](#)
- [92] M. Nagai, H. Mouri, and P. Raksincharoensak. Vehicle lane-tracking control with steering torque input. *Vehicle System Dynamics*, 37 :267–278, 2003. [27](#), [45](#), [88](#)
- [93] H.H. Nagel, W. Enkelmann, and G. Struck. FhG-Co-driver : From map-guided automatic driving by machine vision to a cooperative driver support. *Mathematical and Computer Modelling*, 22(4-7) :185–212, 1995. [21](#)
- [94] Jordan Navarro, Franck Mars, Jean-François Forzy, Myriam El-Jaafari, and Jean-Michel Hoc. Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3) :904–912, 2010. [14](#), [15](#)
- [95] Jordan Navarro, Franck Mars, and Mark S Young. Lateral control assistance in car driving : classification, review and future prospects. *Intelligent Transport Systems, IET*, 5(3) :207–220, 2011. [22](#)
- [96] Lydie Nouvelière. *Commandes robustes appliquées au contrôle assisté d'un véhicule à basse vitesse*. PhD thesis, Laboratoire de Robotique de Versailles, 09 2002. [vii](#), [19](#), [34](#), [157](#)
- [97] O.N.I.S.R. Sécurité routière -Chiffres clés : La mortalité routière en France 2010. Technical report, Ministère de la l'intérieur, de l'outre-mer, des collectivités localeset de l'immigration, septembre 2010. [87](#)

- [98] O.N.I.S.R. Sécurité routière -Chiffres clés : La mortalité routière en France 2012. Technical report, Ministère de la l'intérieur, de l'outre-mer, des collectivités locales et de l'immigration, septembre 2012. [1](#), [12](#)
- [99] Mohammed Oudghiri, Mohammed Chadli, and Ahmed El Hajjaji. Robust observer-based fault-tolerant control for vehicle lateral dynamics. *International Journal of vehicle design*, 48(3) :173–189, 2008. [60](#)
- [100] H.B. Pacejka, E. Bakker, and L. Nyborg. Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies. *SAE paper*, 870421, 1987. [41](#)
- [101] Raja Parasuraman, Thomas B. Sheridan, and Christopher D. Wickens. A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 30(3), MAY 2000. [20](#), [21](#)
- [102] T. Pilutti and A.G. Ulsoy. Identification of driver state for lane-keeping tasks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 29(5) :486–502, 1999. [47](#)
- [103] D. Pomerleau. RALPH : Rapidly adapting lateral position handler. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles' 95 Symposium*, pages 506–511. IEEE, 1995. [10](#), [18](#)
- [104] D. Pomerleau and T. Jochem. Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering. *IEEE expert*, 11(2) :19–27, 1996. [18](#)
- [105] C. Poussot-Vassal. *Commande robuste l'pv multivariable de chassis automobile*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008. [34](#)
- [106] C. Poussot-Vassal, O. Senane, L. Dugard, and SM Savaresi. Vehicle dynamic stability improvements through gain-scheduled steering and braking control. *Vehicle System Dynamics*, 49(10) :1597–1621, 2011. [12](#), [13](#)
- [107] Rajesh Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Springer, 2006. [x](#), [34](#), [37](#), [46](#)
- [108] Jörnßen Reimpell and Helmut Stoll. *The automotive chassis : engineering principles*. Society of Automotive Engineers Warrendale,, PA, USA, 1996. [41](#)
- [109] Jörnßen Reimpell, Helmut Stoll, and Jürgen Betzler. *Automotive chassis : engineering principles*. Butterworth-Heinemann, 2001. [x](#), [46](#)
- [110] R. Risack, N. Mohler, and W. Enkelmann. A video-based lane keeping assistant. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pages 356–361. IEEE, 2002. [10](#), [18](#)
- [111] E. J. Rossetter, J. P. Switks, and J. C. Gerdes. Experimental validation of the potential field lanekeeping system. *International Journal of Automotive Technology*, 5(2) :95–108, 2004. [18](#)
- [112] E.J. Rossetter. *A potential field framework for active vehicle lanekeeping assistance*. PhD thesis, stanford university, 2003. [ix](#), [18](#), [19](#)

- [113] E.J. Rossetter and J.C. Gerdes. Lyapunov based performance guarantees for the potential field lane-keeping assistance system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128 :510, 2006. [18](#)
- [114] A. Sala, T.M. Guerra, and R. Babuska. Perspectives of fuzzy systems and control. *Fuzzy Sets and Systems*, 156(3) :432–444, 2005. [60](#), [70](#)
- [115] Antonio Sala. On the conservativeness of fuzzy and fuzzy-polynomial control of nonlinear systems. *Annual Reviews in Control*, 33(1) :48–58, 2009. [60](#)
- [116] Louay Saleh, Philippe Chevrel, Franck Mars, Jean-François Lafay, Fabien Claveau, et al. Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In *Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, pages 4368–4373, 2011. [47](#)
- [117] Dario D Salvucci and Rob Gray. A two-point visual control model of steering. *Perception-London*, 33(10) :1233–1248, 2004. [47](#)
- [118] B. Schiller, V. Morellas, and M. Donath. Collision avoidance for highway vehicles using the virtual bumper controller. In *1998 IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. Citeseer, 1998. [ix](#), [17](#), [18](#)
- [119] M Selby, WJ Manning, MD Brown, and DA Crolla. A comparison of the relative benefits of active front steering and active rear steering when coordinated with direct yaw moment control. In *Proceedings of ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 1–6, 2001. [13](#)
- [120] C. Sentouh, P. Chevrel, F. Mars, and F. Claveau. A sensorimotor driver model for steering control. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 2462–2467. IEEE, 2009. [x](#), [47](#), [48](#), [49](#)
- [121] C. Sentouh, S. Debernard, JC Popieul, and F. Vanderhaegen. Toward a shared lateral control between driver and steering assist controller. In *Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, volume 11, pages 404–409, 2010. [88](#)
- [122] C. Sentouh, S. Glaser, and S. Mammar. Advanced vehicle–infrastructure–driver speed profile for road departure accident prevention. *Vehicle System Dynamics*, 44 :612–623, 2006. [14](#)
- [123] Chouki Sentouh. *Analyse du risque et d’étection de situations limites : Application au développement des systèmes d’alerte au conducteur*. PhD thesis, Université d’Evry-Val-d’Essonne, 2007. [ix](#), [x](#), [14](#), [15](#), [34](#), [41](#)
- [124] M. Shimakage, S. Satoh, K. Uenuma, and H. Mouri. Design of lane-keeping control with steering torque input. *JSAE Review*, 23(3) :317–323, 2002. [27](#), [88](#)
- [125] Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller. On-road vehicle detection : A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 694–711, 2006. [10](#)
- [126] Jacob Svendenius. *Tire Modeling and Friction Estimation*. PhD thesis, Department of Automatic Control Lund University, 2007. [x](#), [39](#)

- [127] Joshua P Switkes. *Handwheel force feedback with lanekeeping assistance : Combined dynamics, stability and bounding*. PhD thesis, stanford university, 2006. [10](#)
- [128] T. Takagi and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B : Cybernetics*, 15(1) :116–132, 1985. [60](#), [62](#)
- [129] K. Tanaka, T. Ikeda, and H.O. Wang. Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : quadratic stabilizability, H_∞ control theory, and linear matrix inequalities. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(1) :1–13, 1996. [60](#)
- [130] K. Tanaka, T. Ikeda, and H.O. Wang. Fuzzy regulators and fuzzy observers : relaxed stability conditions and LMI-based designs. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(2) :250–265, 1998. [60](#), [62](#), [70](#), [71](#), [112](#)
- [131] K. Tanaka and H.O. Wang. *Fuzzy control systems design and analysis : a linear matrix inequality approach*. Wiley-Interscience, 2001. [60](#)
- [132] Kazuo Tanaka, Masaaki Iwasaki, and Hua O Wang. Stability and smoothness conditions for switching fuzzy systems. In *Proceedings of the 2000 American Control Conference.*, volume 4, pages 2474–2478. IEEE, 2000. [60](#)
- [133] Kazuo Tanaka, Masaaki Iwasaki, and Hua O Wang. Stable switching fuzzy control and its application to a hovercraft type vehicle. In *Fuzzy Systems, 2000. FUZZ IEEE 2000. The Ninth IEEE International Conference on*, volume 2, pages 804–809. IEEE, 2000. [60](#)
- [134] Kazuo Tanaka and Manabu Sano. A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 2(2) :119–134, 1994. [63](#)
- [135] Kazuo Tanaka and Michio Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy sets and systems*, 45(2) :135–156, 1992. [60](#)
- [136] Chen-Sheng Ting. An output-feedback fuzzy approach to guaranteed cost control of vehicle lateral motion. *Mechatronics*, 19(3) :304–312, 2009. [60](#)
- [137] P. F. TOULOTTE. *Attelage virtuel pour véhicules automatisés*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2006. [19](#), [60](#)
- [138] HD Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo, and Y. Yamamoto. Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(2) :324–332, 2001. [72](#)
- [139] Nations Unies. Convention sur la circulation routière. <http://www.unece.org/trans/conventn/crt1968e.pdf>, 11 1968. [84](#)
- [140] Anton T. van Zanten. Evolution of Electronic Control Systems for Improving the Vehicle Dynamic Behavior. In *International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, Hiroshima, Japan, 2002. [12](#)

- [141] Benoit Vanholme. *Highly Automated Driving on Highways based on Legal Safety*. PhD thesis, University of Evry-Val-d'Essonne, June 2012. [13](#), [84](#)
- [142] Thérèse Villame. Conception de systèmes d'assistance au conducteur : comment prendre en compte le caractère complexe, dynamique et situé de la conduite automobile. *Cognition située et conception de systèmes d'assistance au conducteur. @ ctivités*, 1(2) :147–163, 2005. [8](#)
- [143] H.O. Wang, K. Tanaka, and M.F. Griffin. An approach to fuzzy control of nonlinear systems : Stability and design issues. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(1) :14–23, 1996. [62](#), [71](#)
- [144] J.G. Wohl. Man-machine steering dynamics. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 3(4) :222–228, 1961. [47](#)
- [145] S.J. Wu and C.T. Lin. Optimal fuzzy controller design : local concept approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(2) :171–185, 2000. [60](#)
- [146] Liu Xiaodong and Zhang Qingling. New approaches to H_∞ controller designs based on fuzzy observers for TS fuzzy systems via LMI. *Automatica*, 39(9) :1571–1582, 2003. [112](#)
- [147] Jun Yoneyama, Masahiro Nishikawa, Hitoshi Katayama, and Akira Ichikawa. Output stabilization of Takagi–Sugeno fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 111(2) :253–266, 2000. [124](#)
- [148] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3) :338–353, 1965. [59](#)
- [149] Pengjun Zheng and Mike McDonald. Manual vs. adaptive cruise control - Can driver's expectation be matched? *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 13(5-6) :421–431, 2005. [17](#)

Annexe A

Annexe

A.1 Modélisation de la chaîne de traction du véhicule [96] [12]

Remarque A.1 On adopte la notation de l'indice f pour désigner l'avant et l'indice r pour désigner l'arrière.

Rappelons que la dynamique de l'expression du mouvement de translation longitudinale du véhicule est :

$$m(\dot{v}_x - v_y r) = F_{xf} + F_{xr} - c_x v_x |v_x| \quad (\text{A.1})$$

En supposant que seules les roues avant sont tractrices, le calcul du mouvement de rotation pour chaque roue donne :

$$\begin{cases} I_{eqf} \dot{w}_f = T_t - F_{xf} r_f - T_{resf} \\ I_{rr} \dot{w}_r = -F_{xr} r_r - T_{resr} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Où $w_{f,r}$ est la vitesse angulaire de la roue f,r , $r_{\{f,r\}}$ est le rayon de la roue, T_t est le couple de traction, T_{resf} et T_{resr} sont les couples résistants équivalant. I_{eqf} est l'inertie du groupe transmission et du moteur ramenée à l'axe de la roue avant telle que :

$$I_{eqf} = I_{rf} + \frac{I_m}{(R_g R_d)^2}$$

et

$$T_t = \frac{1}{(R_g R_d)} T_m$$

I_{rf} , I_{rr} sont, respectivement, les moments d'inertie des roues, R_g est le rapport de vitesse et R_d est celui du différentiel.

En déduisant l'expression des forces des pneumatique avant et arrière dans (A.2), en la remplaçant dans (A.4) on obtient :

$$m(\dot{v}_x - v_y r) = \frac{1}{r} (T_t - T_{ref} - T_{resr} - I_{rr} \dot{w}_r - I_{eqr} \dot{w}_f) - c_x v_x |v_x| \quad (\text{A.3})$$

En supposant que le roulement des roues se fait sans glissement ($\lambda = 0$) $v_{xi} = r_i w_i$ pour $i = \{f, r\}$ et la vitesse linéaire d'un pneumatique est égale à la vitesse longitudinale du véhicule $v_x = r w$ on peut réécrire (A.3) en :

$$m(\dot{v}_x - v_y r) = \frac{1}{r}(T_t - T_{ref} - T_{resr} - I_{rr}r\dot{v}_x - I_{eqr}r\dot{v}_x) - c_x v_x |v_x| \quad (\text{A.4})$$

$$\Rightarrow \dot{v}_x = \frac{T_t - T_r}{I_{eff}} - \frac{c_x v_x |v_x|}{m} + v_y r \quad (\text{A.5})$$

Avec : $I_{eff} = \frac{I_m + (R_g R_d)^2 (I_r + I_f + m r^2)}{R_{gi} R_d}$

A.2 Paramètres du véhicule

Les différentes valeurs des paramètres du véhicule sont résumées dans le tableau ci-dessous

Paramètre	valeur	unité	Paramètre	valeur	unité
m	1500	(kg)	I_z	2454	($kg.m^2$)
l_f	1.0065	(m)	l_r	1.4625	(m)
C_f	47135	(N/rad)	C_r	56636	(N/rad)
J_s	0.05	(kgm^2)	B_s	0.5	($N/rad/s$)
R_s	16	-	η_t	0.13	(m)

Résumé : Le travail présenté dans la thèse s'inscrit dans le projet de recherche partenarial ANR-ABV 2009 dont l'objet est la conception d'un système de conduite automatisée à basse vitesse. Il décrit et analyse les principes d'un contrôle partagé d'un véhicule automobile entre un conducteur humain et un copilote électronique (E-copilote). L'objectif est de mettre en place une coopération Homme-Machine efficace entre le conducteur et l'E-copilote. Un des enjeux est notamment de permettre au conducteur d'interagir avec l'E-copilote de façon continue pour pouvoir exécuter les manœuvres qu'il souhaite sans nécessiter la désactivation ni être gêné par l'E-copilote. Cet enjeu répond au besoin de prise en compte des actions du conducteur entreprises pour pallier celles du E-copilote dans certaines situations par exemple éviter un obstacle non perçu par le système. L'objectif dans ce cas est de garantir le confort au conducteur ainsi que sa conscience du mode engagé (système actif ou pas). Le conducteur et l'E-copilote agissant simultanément sur le système de direction, chacun doit être conscient des actions de l'autre : une communication bidirectionnelle est essentielle. Pour atteindre cet objectif, nous avons retenu les interactions haptiques à travers le système de direction du véhicule. Le couple appliqué par le conducteur sur volant est utilisé par l'E-copilote pour prendre en compte ces actions de la même façon que le couple produit par l'E-copilote est ressenti par le conducteur et utilisé pour comprendre le comportement du système. D'autres aspects essentiels pour la coopération H-M ont également été abordés : l'étude des changements de modes de fonctionnement du système ainsi que l'IHM via laquelle le conducteur interagit avec le système.

Mots clés : Véhicule Autonome, Conduite Partagée, Coopération Homme-Machine, Interface Homme-Machine, Commande Optimale, Logique Floue, Modélisation et Commande Takagi-Sugeno, Observateur à Entrées Inconnues

Abstract : The work presented in the thesis is part of the research partnership project ANR-ABV 2009 which aims is to design an automated low-speed driving. It describes and analyzes the principles of shared control of a motor vehicle between a human driver and an electronic copilot (E-copilot). The objective is to establish effective human-machine cooperation between the driver and E-copilot. One issue is particular to allow the driver to interact with the E-copilot continuously in order to perform maneuvers he wants without requiring deactivation neither constrained by E-copilot. This issue addresses the need for consideration of driver actions taken to remedy those of E-copilot for example avoiding undetected obstacle by the system while ensuring operator comfort and the driver situation awareness. The driver and E-co-pilot acting simultaneously on the steering system, everyone must be aware of the actions of the other : two-way communication is essential. To achieve this goal, we used the haptic interactions through the steering system of the vehicle. The torque applied by the driver on the steering wheel is used by the E-copilot to take into account these actions as the torque produced by the E-copilot is felt by the driver and used to understand the system's behavior. Other key issues for the Human-Machine Cooperation were also discussed : the study of changes in modes of operation of the system and HMI via which the driver interact with the system.

Keywords : Autonomous Vehicle, Shared Control, Human-Machine Co-operation, Human-Machine Interface, Optimal Control, Fuzzy Logic, Takagi-Sugeno Modelling and Control, Unknown Inputs Observer.

systeme

[illegible]