

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electrotechnique et
Automatique



Mémoire de Master

Spécialité : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

Sous la direction de : DR. MERAH ABDELKADER

Thème :

**Commande stochastique à horizon fini appliquée
au guidage latéral d'un véhicule autonome**

Présenté par :

**AHMED TAAMMA
OUSSAMA RAHMANI**

Président de jury :

Examineurs :

Promotion 2025/2026

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus vifs à notre encadreur Dr. Abdelkader Merah, qui a su nous guider et nous aider dans ce travail avec beaucoup de tact et de gentillesse et qui nous a permis de découvrir un domaine très intéressant celui des systèmes d'aide à la conduite. Qu'il trouve ici notre estime et notre profond respect.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé, à titre professionnel ou personnel à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements iront également vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de ce mémoire.

Dedicase

*C'est avec une immense fierté et une profonde gratitude
que nous dédions ce modeste travail...*

◆ À nos très chers parents ◆

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect
que nous vous portons. Vous avez tout sacrifié pour nous,
vous nous avez offert le plus beau cadeau : l'éducation.
Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.*

◆ À nos frères et sœurs ◆

*Pour votre présence, votre affection et vos encouragements
qui ont été pour nous une source de force et de motivation.
Merci d'avoir toujours été là dans les moments difficiles.*

◆ À nos amis et collègues ◆

*À ceux qui ont partagé avec nous les joies et les peines
de ces années d'études, les longues nuits de travail,
les doutes et les victoires. Votre amitié est un trésor précieux.*

◆ À nos enseignants ◆

*À tous ceux qui ont contribué à notre formation,
qui nous ont transmis leur savoir avec passion et dévouement.
Votre empreinte restera gravée dans notre mémoire.*

*À tous ceux dont le cœur bat à notre unisson,
à tous ceux que nous aimons et qui nous aiment,
nous dédions ce travail comme un témoignage de notre amour
et notre reconnaissance éternelle.*

Ahmed TAAMMA & Oussama RAHMANI

Résumé

Ce travail présente la conception d'un régulateur stochastique à horizon fini (FHS-LQR), basé sur la formulation de Riccati-ZXL, dédié au contrôle latéral des véhicules évoluant dans un environnement soumis à des incertitudes paramétriques, des perturbations dynamiques et un délai de commande. L'approche proposée vise à améliorer la robustesse et la stabilité du système, en intégrant explicitement le caractère aléatoire des perturbations ainsi que les effets du retard de commande.

Une comparaison est réalisée avec la commande LQR classique, qui ne prend pas en compte ces phénomènes. Les résultats montrent que l'approche FHS-LQR permet d'obtenir de meilleures performances en suivi de trajectoire, tout en respectant les contraintes physiques du véhicule et en améliorant la sécurité et le confort de conduite.

Mots Clé : Commande stochastique ; FHS-LQR ; Riccati-ZXL ; contrôle latéral ; véhicule autonome ; délai de commande ; incertitudes paramétriques ; robustesse.

Abstract

This work presents the design of a finite-horizon stochastic linear quadratic regulator (FHS-LQR) based on the Riccati-ZXL formulation, dedicated to lateral vehicle control in environments subject to parametric uncertainties, dynamic disturbances, and control delays. The proposed approach aims to enhance system robustness and stability by explicitly accounting for the stochastic nature of disturbances as well as delay effects commonly encountered in real-world systems.

A comparative study is conducted with the classical LQR controller, which does not consider these factors. The results demonstrate that the FHS-LQR approach achieves improved trajectory tracking performance, while satisfying vehicle physical constraints and enhancing driving safety and comfort.

Keywords: Stochastic control; FHS-LQR; Riccati-ZXL; lateral control; autonomous vehicle; control delay; parametric uncertainties; robustness.

Sommaire

Chapitre I

Assistance préventive au contrôle latéral d'un véhicule

Introduction générale	15
I.1 Introduction	17
I.2. Progression de l'intrusion de l'aide au guidage latéral	17
I.3 Les systèmes de sécurité préventive	19
I.4 Positionnement du véhicule sur la voie	21
I.5 Assistance préventive à la sortie de voie	22
I.6 Conclusion	24

Chapitre II

Modélisation du véhicule et de son environnement

II.1 Introduction	26
II.2 Modélisation de véhicule.....	26
II.3 La colonne de direction assistée électrique	29
II.4 Linéarisation du modèle du véhicule	31
II.5 Élaboration du modèle global véhicule-route (VR).....	36
II.6 conclusions	37

Chapitre III

Conception des stratégies de commande

III.1. Introduction.....	40
III.2 la commande linéaire quadratique.....	40
III.2.1 Régulateur linéaire quadratique	41
III.2.2 Choix des matrices de pondération.....	41
III.3 Commande linéaire quadratique stochastique à horizon fini (FHS-LQR)	43
III.3.1. Variation paramétrique.....	43
III.3.2. Simulation de scénarios perturbés.....	46

III.3.3. Identification expérimentale.....	48
III.4 Contrôle partagé entre copilote et conducteur.....	49
II.5 Conclusion.....	51

Chapitre IV

Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction.....	53
IV.2. Les séries de simulations.....	54
IV.2.1 Première série	56
IV.2.2 Deuxième série	63
IV.3 Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	71
Bibliographie.....	73

Liste des symboles

Symbole	Définition
<i>Angles et orientations</i>	
θ	Angle de tangage.
φ	Angle de roulis.
ψ	Angle de cap (lacet).
δf	Angle de braquage des roues avant.
δv	Angle de braquage du volant.
αf	Angle de glissement des pneus avant.
αr	Angle de glissement des pneus arrière.
β	Angle de dérive du véhicule.
ψl	Erreur sur l'angle de cap (angle relatif véhicule/route).
ρ	Courbure de la route au centre de gravité.
<i>Cinématique et vitesses</i>	
r	Vitesse de lacet (yaw rate).
V_x	Vitesse longitudinale du véhicule.
V_y	Vitesse latérale du véhicule.
V	Vitesse linéaire du véhicule.
$\dot{x}, \dot{y}$	Vitesses linéaires selon les axes X et Y.
<i>Géométrie du véhicule</i>	
CG	Centre de gravité du véhicule.
L_f	Longueur entre le train avant et le centre de gravité (m).
L_r	Longueur entre le train arrière et le centre de gravité (m).

Symbole	Définition
L	Longueur entre les deux trains avant et arrière ($L = L_f + L_r$).
h_{cg}	Hauteur du centre de gravité (m).
e	Moitié de la longueur du train arrière (demi-voie) (m).
la	Distance de mesure de vision en avant du véhicule (m).
<i>Masses et inerties</i>	
m	Masse du véhicule (kg).
I_z	Moment d'inertie du véhicule autour de l'axe Z ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).
J_w	Moment d'inertie de la roue ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).
<i>Forces et couples</i>	
F_y	Force latérale totale (N).
F_x	Force longitudinale totale (N).
F_{yf}, F_{yr}	Forces latérales appliquées aux roues avant et arrière respectivement (N).
F_w	Force due au vent latéral (N).
T_d	Couple du conducteur ($\text{N}\cdot\text{m}$).
T_a	Couple d'assistance ($\text{N}\cdot\text{m}$).
T_s	Couple d'auto-alignement ($\text{N}\cdot\text{m}$).
M_z	Moment de lacet résultant autour de l'axe Z ($\text{N}\cdot\text{m}$).
<i>Colonne de direction</i>	
g	Chasse géométrique (m).
n	Rapport de réduction de la direction.
J_c	Moment d'inertie de la colonne de direction ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).
K_m	Gain de direction manuelle.
<i>Paramètres aérodynamiques</i>	

Symbole	Définition
A_f	Section frontale du véhicule (m ²).
ρ_{air}	Densité volumique de l'air (kg·m ⁻³).
C_x	Coefficient de pénétration de l'air (traînée aérodynamique).
f_0	Coefficient de résistance au roulement.
Pneumatiques	
C_{af}	Rigidité au glissement latéral des pneus avant (N/rad).
C_{ar}	Rigidité au glissement latéral des pneus arrière (N/rad).
σ	Coefficient de glissement longitudinal.
μ	Coefficient d'adhérence pneu-chaussée.
C	Coefficient de raideur du pneumatique.
B	Facteur de forme (modèle de Pacejka).
F_{max}	Valeur maximale de la force de contact pneu-chaussée (N).
Système de vision et positionnement	
Y_L	Écart latéral du véhicule par rapport au centre de la voie (m).
ψ_r	Angle de la route (cap de référence).
R	Rayon de courbure de la route (m).
Commande optimale (LQR / FHS-LQR)	
x	Vecteur d'état du système.
u	Vecteur de commande.
A, B	Matrices dynamique et d'entrée du système.
Q, R	Matrices de pondération des états et de la commande.
K	Gain de retour d'état (matrice de gain LQR).
P	Solution de l'équation algébrique de Riccati.

Symbole	Définition
J	Fonction de coût (critère quadratique).
N	Horizon de prédiction (FHS-LQR).
αA	Niveau d'incertitude sur la matrice dynamique A.
σB	Niveau d'incertitude sur la matrice d'entrée B.
d	Retard (délai) de commande (nombre de pas discrets).
$\omega A(k)$	Incertitude multiplicative affectant la matrice A à l'instant k.
$\omega B(k)$	Incertitude multiplicative affectant la matrice B à l'instant k.
G	Matrice de gain reliant la courbure de la route au système.
ρ_{ref}	Profil de courbure de la route (trajectoire de référence).

Liste des acronymes

Acronyme	Signification
<i>ADAS</i>	Advanced Driver Assistance Systems — Systèmes avancés d'aide à la conduite.
<i>ABS</i>	Anti-lock Braking System — Système anti-blocage de roues.
<i>ESP</i>	Electronic Stability Program — Programme électronique de stabilité.
<i>LKS</i>	Lane Keeping System — Système de maintien de voie (action continue).
<i>LDA</i>	Lane Departure Avoidance — Système d'évitement de sortie de voie (conditionnel).
<i>LQR</i>	Linear Quadratic Regulator — Régulateur linéaire quadratique.
<i>FHS-LQR</i>	Finite Horizon Stochastic LQR — Régulateur LQR stochastique à horizon fini.
<i>VR</i>	Modèle global Véhicule-Route.
<i>TLC</i>	Time to Line Crossing — Temps avant sortie de voie.
<i>CG</i>	Centre de Gravité du véhicule.
<i>EPS</i>	Electric Power Steering — Direction assistée électrique.
<i>GPS</i>	Global Positioning System — Système de positionnement par satellite.
<i>RMS</i>	Root Mean Square — Valeur efficace (moyenne quadratique).

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Systèmes LKS/LDA [Swi-06].....	19
Figure I.2	Caméra en vision frontale.....	20
Figure I.3	Positionnement du véhicule sur la voie.....	21
Figure I.4	Moteur électrique installé sur la colonne de direction.....	23
Figure I.5	Système LKS/LDA.....	23

Chapitre II

Figure II.1	Mouvements du véhicule dans le système d'axes (X,Y).....	27
Figure II.2	Forces au niveau des roues du véhicule dans le plan (X,Y).....	28
Figure II.3	Modèle réduit de la colonne de direction.....	30
Figure II.4	Modèle de la colonne de direction pour la synthèse des lois de commande ...	31
Figure II.5	Les différents mouvements de véhicule.....	32
Figure II.6	Modèle bicyclette	33
Figure II.7	Forces au niveau du contact pneu/chaussée.....	33
Figure II.8	Forme de la courbe d'adhérence.....	34

Chapitre III

Figure III.1	Architecteur de Contrôle partagé	49
---------------------	--	----

Chapitre IV

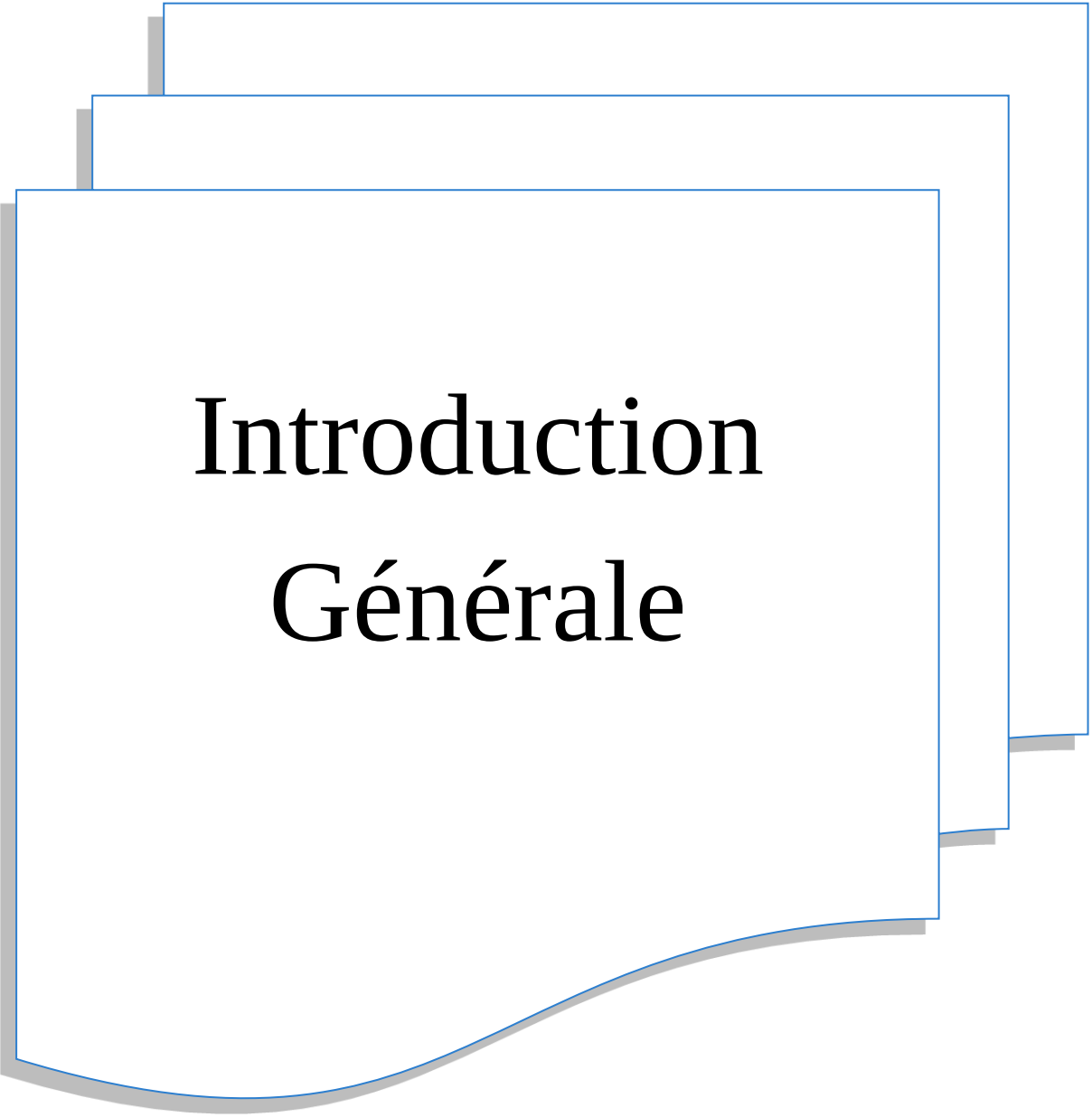
Figure IV.1	Schéma bloc du système proposé pour la simulation.....	53
Figure IV.2	Rayon de courbure de piste d'essai	54
Figure IV.3	Rayon de uncertainty	55
Figure IV.4	Rayon de conducteur contrôle.....	55
Figure IV.5	Couples appliquées sur le volant (LQR).....	56
Figure IV.6	Couples appliquées sur le volant(fhs LQR).....	56
Figure. IV.7	Couples assistances appliquées sur le volant	57

Figure. IV.8	Angle de volantT.....	57
Figure. IV.9	Déplacement latéral	58
Figure. IV.10	Erreur sur l'angle de cap.....	58
Figure. IV.11	Vitesse de lacet	59
Figure. IV.12	Angle de dérive	59
Figure. IV.13	Trajectoire de véhicule	60
Figure. IV.14	Accélération latéral	61
Figure. IV.15	Couples appliquées sur le volant (LQR) (délai=30 ms).....	63
Figure. IV.16	Couples appliquées sur le volant (fhs LQR)(délai=30 ms)	63
Figure. IV.17	Couples assistances appliquées sur le volant (délai=30 ms).....	64
Figure. IV.18	Angle de volant (délai=30 ms).....	64
Figure. IV.19	Déplacement latéral.....	65
Figure. IV.20	Erreur sur l'angle de cap (délai=30 ms).....	65
Figure. IV.21	Vitesse de lacet (délai=30 ms).....	66
Figure. IV.22	Angle de dérive (délai=30 ms).....	66
Figure. IV.23	Trajectoire de véhicule	67
Figure. IV.24	Accélération latéral (délai=30 ms).....	68

Liste des tableaux

Chapitre IV

Tableau IV.1	Comparaison des performances RMS LQR vs FHS-LQR (sans délai).....	60
Tableau IV.2	Comparaison des valeurs maximales et coûts de performance (sans délai)...	60
Tableau IV.3	Comparaison des performances RMS LQR vs FHS-LQR (délai=30ms).....	67
Tableau IV.4	Comparaison des valeurs maximales et coûts de performance (délai=30ms)...	67



Introduction Générale

Introduction générale

La conduite automobile demeure une activité à risque, générant des pertes humaines et économiques considérables. Les accidents liés aux sorties de voie représentent, selon les statistiques, entre 30 % et 40 % des sinistres, et résultent principalement d'une perte de contrôle du véhicule, due à la fatigue, à l'inattention, à une vitesse excessive ou à des conditions défavorables telles qu'une faible adhérence ou une visibilité réduite.

Face à ces enjeux, les systèmes d'aide à la conduite (ADAS) ont connu un développement important, visant à assister le conducteur et améliorer la sécurité routière. Ces systèmes sont généralement classés en trois catégories :

- sécurité passive, visant à limiter les conséquences d'un accident ;
- sécurité active, agissant sur la dynamique du véhicule en situation critique ;
- sécurité préventive, permettant d'anticiper les situations dangereuses.

Dans le domaine du contrôle latéral, les systèmes de type LDA (Lane Departure Avoidance) et LKS (Lane Keeping Support) jouent un rôle essentiel en assurant le maintien du véhicule dans sa voie.

Problématique

Malgré les avancées réalisées, les systèmes de contrôle latéral doivent faire face à plusieurs défis majeurs, notamment la présence d'incertitudes paramétriques, de perturbations externes et de délais de commande, qui peuvent dégrader les performances et compromettre la stabilité du véhicule. Par ailleurs, la prise en compte de l'interaction entre le conducteur et le système d'assistance constitue un enjeu important dans les architectures de contrôle partagé.

Objectif et contribution

L'objectif de ce travail est de concevoir et d'évaluer une stratégie de contrôle latéral robuste, capable de garantir stabilité, précision de suivi et confort de conduite, dans des conditions réalistes.

La contribution principale de ce travail réside dans :

- l'utilisation d'un modèle global véhicule–route (VR) intégrant la dynamique du véhicule, la direction et le système de vision ;
- l'application de la commande LQR et de son extension stochastique à horizon fini (FHS-LQR) ;
- la prise en compte explicite de incertitudes multiplicatives et du délai de commande ;
- l'intégration d'une architecture de contrôle partagé entre conducteur et système d'assistance.

Organisation du mémoire

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres :

- **Chapitre I : Assistance préventive au contrôle latéral du véhicule**

Présentation de l'état de l'art des systèmes ADAS, avec un accent particulier sur le contrôle latéral et les dispositifs embarqués.

- **Chapitre II : Modélisation du véhicule et de son environnement**

Développement du modèle dynamique du véhicule, intégrant les aspects mécaniques, aérodynamiques et l'interaction véhicule–route. La linéarisation du modèle y est également réalisée afin de permettre la synthèse des lois de commande.

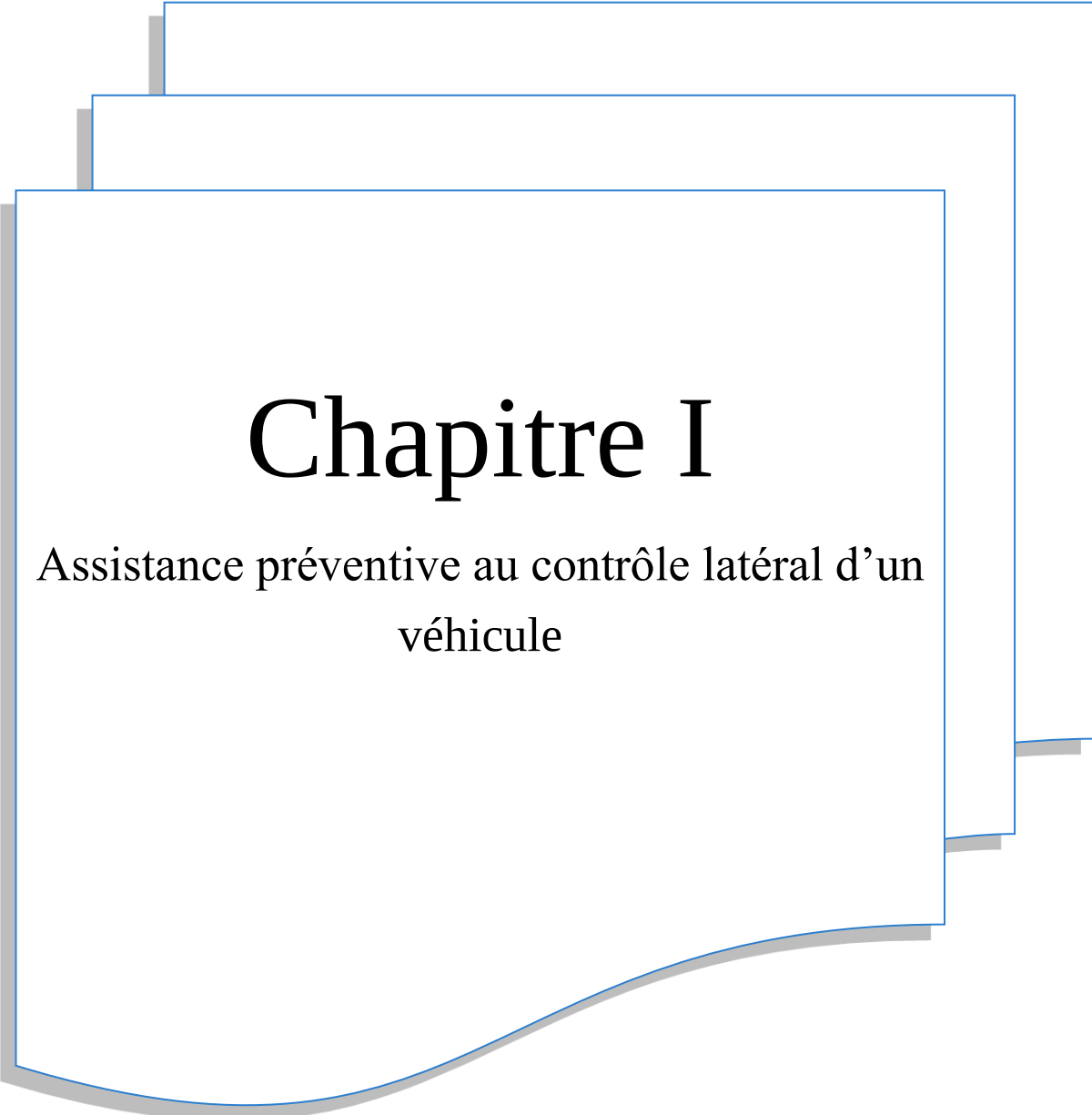
- **Chapitre III : Conception des stratégies de commande**

Présentation des méthodes de commande, appliquées au modèle linéarisé établi au Chapitre II, avec prise en compte des incertitudes et du délai.

- **Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats**

Analyse des performances des stratégies de commande à travers des simulations, incluant des perturbations et différents niveaux d'implication du conducteur.

Enfin, une conclusion générale synthétise les résultats obtenus et propose des perspectives de recherche futures.



Chapitre I

Assistance préventive au contrôle latéral d'un
véhicule

I.1 Introduction

La commande d'un véhicule constitue un domaine vaste, structuré en plusieurs sous-disciplines liées à la dynamique et au contrôle. Dans le cadre du pilotage dynamique du véhicule, trois fonctions principales se distinguent : la commande longitudinale, la commande latérale et la commande verticale.

La commande longitudinale vise à réguler la vitesse du véhicule en agissant sur les systèmes d'accélération et de freinage. Elle peut également intégrer des paramètres de conduite avancés, tels que les conditions d'adhérence pneu-chaussée, afin d'améliorer la sécurité et les performances globales.

La commande latérale est dédiée au maintien de la trajectoire et au suivi de voie. Elle agit principalement sur les organes de direction, notamment la colonne de direction et l'angle de braquage des roues, afin d'assurer la stabilité directionnelle du véhicule.

La commande verticale concerne le contrôle des mouvements de suspension, en agissant sur les forces entre la roue et la caisse du véhicule. Elle vise à améliorer le confort des passagers et la tenue de route, en atténuant les vibrations dues aux irrégularités de la chaussée.

I.2. Progression de l'intrusion de l'aide au guidage latéral

Le guidage latéral automatique du véhicule a toujours constitué un point d'intérêt dès le début des systèmes intelligents de transport. Vers la fin des années 70, le ministère allemand de la recherche et de la technologie initiait un projet pour l'amélioration des performances du réseau de transport en commun dans les grandes villes [Kan-87]. Le résultat qui en découla est le système « 0-Bahn », qui rassemblait les avantages des transports ferrés et routiers. Des bus ont été conçus pour circuler sur des voies étroites spécialement aménagées. Cependant, pour rouler dans ces voies les bus avaient besoin d'un contrôle de la direction de grande précision. Ceci a été réalisé via un câble électrique noyé au milieu de la voie. Une antenne embarquée permettait de mesurer les déviations du bus par rapport au câble et un dispositif de braquage automatique réalisait le contrôle automatique du bus le long du câble. L'idée d'utiliser un câble électrique a par ailleurs été explorée par de nombreux auteurs. Les études ont démontré qu'une précision du contrôle de l'ordre de 2cm pouvait être atteinte [Fen-60], [Gar-60-70].

Vers la fin des années 90, les recherches mettent davantage l'accent sur le conducteur qu'on ne cherche plus à remplacer, mais à aider dans ses tâches de conduite. C'est le concept du « copilote » intelligent qui informe, averti et qui au final agit en cas de défaillance du conducteur qui s'impose [Fra-92]. Cinq niveaux d'assistance ont été proposés par [Kop-94], puis utilisés dans le contexte de la conduite automatisée par [Yua-98] : (1) information, (2) conseil, (3) avertissement, (4) assistance et (5) intervention. Dans les premiers niveaux - information, conseil et avertissement, il s'agit d'une aide passive, qui peut influencer le conducteur, mais pas directement la dynamique du véhicule, tandis que dans les suivants modes d'assistance et d'intervention des actionneurs sont prévus pour agir sur la dynamique du véhicule (aide active). À titre d'exemple, le projet ARCOS a défini les modes d'assistance suivants [Mam-05] :

- Mode instrumenté : le conducteur est informé. Les informations primaires peuvent être fournies par des capteurs ou reconstituées par des observateurs. L'information peut se faire par affichage direct ou après traitement.
- Mode avertissement : le conducteur est averti en cas de risque. L'information est associée à une mesure de risque. Les mesures de risque de sortie de voie peuvent être l'accélération latérale, la vitesse de lacet, la vitesse latérale, l'écart latéral, l'angle de cap par rapport à l'axe de la voie ou le temps à sortie de voie (TLC), [Mam-06].
- Mode limite : les actions du conducteur sont limitées pour diminuer la croissance d'une mesure de risque.
- Mode médiatisé : le conducteur a l'initiative de l'action, mais le système de sécurité amplifie cette action pour réduire le risque d'accident.
- Mode régulé : le conducteur et l'assistance contrôlent simultanément le véhicule.
- Mode automatisé : le véhicule est contrôlé automatiquement et les actions du conducteur sont inhibées.

Tous ces modes utilisent des applications embarquées qui fournissent le positionnement du véhicule par rapport à sa voie de circulation et calculent les indicateurs de risque.

I.3 Les systèmes de sécurité préventive

Les automates d'assistance agissent souvent sur le volant via un moteur électrique à courant continu monté sur la colonne de direction. Ce moteur est chargé de produire une commande visant le contrôle du couple ou de l'angle de braquage. L'intervention de l'assistance pourrait aussi s'opérer sur le freinage différentiel en induisant un moment de lacet qui modifie la direction du véhicule.

Selon le mode de fonctionnement, les systèmes préventifs de sortie de voie prennent la forme d'un système LKS (Lane Keeping Support), ou d'un système LDA (Lane Departure Avoidance). La différence principale entre les deux types de systèmes est que le LKS agit de façon continue pour le maintien sur la voie, tandis que le LDA agit de manière conditionnelle sur la base d'un seuil de criticité.

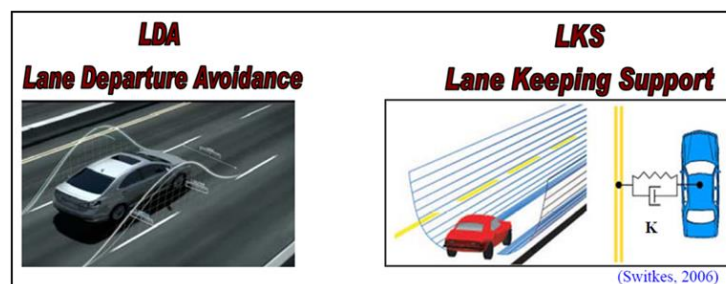


Figure.I.1 Systems.LKS/LDA [Swi-06]

Le LKS agit en continu pour faciliter le maintien dans la voie. Il aide à éviter la sortie de voie en réduisant la déviation latérale du centre de la trajectoire. Le couple ajouté au volant oppose une résistance lorsque le conducteur s'éloigne du centre de la voie et l'incite à aller dans le sens de l'automate. Le LKS peut être représenté comme un ressort qui crée autour du véhicule un genre de champ potentiel [Swi-06]. On peut trouver un système LKS dans la Nissan Cima 2001 par exemple, ou encore dans la Honda Accord 2004 et la Volkswagen Passat CC 2008.

Le LDA anticipe la sortie de voie et agit de manière conditionnelle afin de l'éviter. L'assistance est définie par une stratégie de commutation entre le conducteur et une loi de commande selon la situation du véhicule relativement à une zone de conduite considérée comme normale. Cette zone est caractérisée par des seuils définis à partir de l'écart latéral et du couple conducteur. Le LDA introduit une action pour corriger ce qu'il diagnostique comme une erreur de conduite, il envoie une alerte au conducteur quand le véhicule est proche de la

sortie de voie, puis il dirige automatiquement le véhicule vers le centre de la voie [Ena-08], [Gla10].

Les systèmes actuels d'assistance au suivi de voie visent à fonctionner sur des routes de faible courbure (autoroute) où le véhicule roule à une vitesse supérieure à 60 km/h. L'assistance assure la sécurité du véhicule lors d'une conduite dégradée caractérisée soit par l'inattention du conducteur (malaise, endormissement, assoupissement, évanouissement, fatigue, alcoolisation, hypovigilance, activité annexe, etc.) ou par une erreur de guidage.

Pour se positionner sur la voie et mesurer l'orientation du véhicule par rapport à la route, les automates d'assistance peuvent s'appuyer sur une caméra frontale qui peut fournir le positionnement latéral et l'erreur sur l'angle de cap grâce à deux algorithmes de vision exécutés en temps réel et en parallèle. D'autres dispositifs, tels que les marquages magnétiques ou le GPS différentiel, permettent de répondre aux défaillances du module de vision dont les performances s'avèrent dépendantes des conditions climatiques. Lorsqu'ils sont couplés à l'information délivrée via la caméra, la localisation latérale du véhicule est rendue plus précise et plus fiable.

Les systèmes de contrôle latéral du véhicule se servent principalement des capteurs qui positionnent le véhicule par rapport à sa voie de circulation (Figure I.2), des capteurs qui mesurent la dynamique du véhicule [Ena-08].



Figure.I.2 Caméra en vision frontale

I.4 Positionnement du véhicule sur la voie

Le positionnement du véhicule sur la voie, sera donné par un système de vision. Ce système est chargé de fournir les informations sur la position du véhicule et la géométrie de la route. Ce système fournit deux mesures (Figure I.3) :

- ψ_L : L'erreur sur l'angle de cap, à savoir la différence entre le cap de véhicule ψ et l'angle de la route ψ_d
- Y_L l'écart latéral du véhicule par rapport au centre de voie, mesuré à une distance l_s en avant du véhicule.

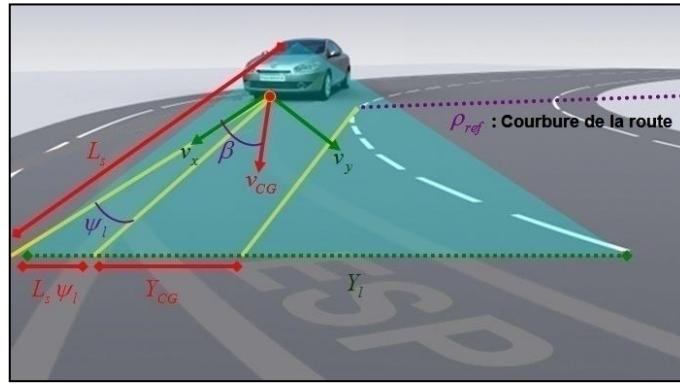


Figure.I.3 Positionnement du véhicule sur la voie

La mesure de l'erreur latérale à une distance l_s , permet de compenser des retards introduits par le traitement des mesures et les délais dus aux actionneurs physiques du véhicule. Selon [Raj-06] :

$$\psi_L = \psi - \psi_d \Rightarrow \dot{\psi}_L = r - V_x \rho_{ref} \quad (I.1)$$

$$\dot{Y}_L = \beta V_x + l_s r + \psi_L V_x \quad (I.2)$$

ρ_{ref} est la courbure de la route au centre de gravité CG, $\rho_{ref} = 1/R$ où R est le rayon de la route au centre de gravité du véhicule. Le « positionnement du véhicule sur la voie » peut être donc donné par le modèle suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_l \\ \dot{Y}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ V_x & l_s & V_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \psi_l \\ Y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_x \\ 0 \end{bmatrix} \rho_{ref} \quad (I.3)$$

Quand Y_L n'est pas directement mesurable, cet écart peut être approché par la projection de l'offset du centre de gravité du véhicule (Y_{CG}) à une distance l_s :

$$Y_L = Y_{CG} + \psi_l l_s \quad (I.4)$$

Dans ce cas, on trouve que :

$$\dot{Y}_L = \beta V_x + l_s r + \psi_l V_x - l_s V_x \rho_{ref} \quad (I.5)$$

Le modèle « positionnement sur la voie » deviendra :

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_l \\ \dot{Y}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ V_x & l_s & V_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \psi_l \\ Y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_x \\ -l_s V_x \end{bmatrix} \rho_{ref} \quad (I.6)$$

I.5 Assistance préventive à la sortie de voie

L'intervention de l'assistance pourrait s'opérer sur le freinage différentiel en induisant un moment de lacet qui modifie la direction du véhicule. L'approche par le freinage différentiel offre l'avantage de la dissociation des couples de l'automate et du conducteur, mais il présente l'inconvénient d'une efficacité réduite dans certaines situations. Les automates d'assistance pourrait aussi agir souvent sur le volant via un moteur électrique à courant continu monté sur la colonne de direction. Ce moteur est chargé de produire une commande visant le contrôle du couple ou de l'angle de braquage (Figure I.4).



Figure.I.4 Moteur électrique installé sur la colonne de direction.

Certains modèles considèrent que l'action au volant est effectuée en termes de couple de braquage (ex. [Sen-09], d'autre la considère en termes d'angle de braquage (ex. [Col-08], ([Tof-07])). La considération de l'angle est justifiée par des considérations de robustesse du comportement du conducteur face aux changements des caractéristiques du retour d'effort sur le volant, tandis que la considération du couple est justifiée par le degré de liberté qu'elle offre, pour la prise en compte de l'intervention éventuelle d'un automate d'assistance [Nag-02].

La Figure (I.5) représente une reformulation unifiée des systèmes LKS et LDA. Chacun de ces deux systèmes peut être obtenu en modifiant le coefficient du contrôle mutuel (α_m) entre le conducteur et un automate de suivi de voie. Dans le cas d'un système LKS, α_m est constant (comme dans Honda où $\alpha_m = 80\%$). Par contre, pour un LDA, α_m bascule dynamiquement entre 0 et 1 en fonction des seuils définis sur les critères de risque.

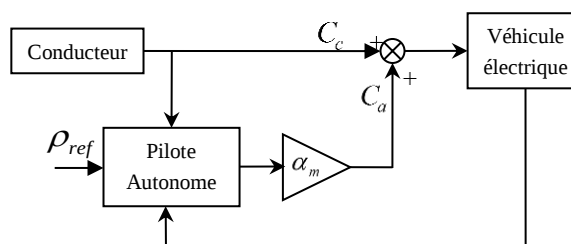


Figure.I.5 Systèmes LKS/LDA

Lorsque le conducteur négocie bien sa trajectoire, le LKS mesure en permanence l'angle idéal au volant pour rester sur la bonne trajectoire et produit une partie constante (α_m) de l'effort nécessaire pour accompagner le mouvement, et le conducteur complète le mouvement. En

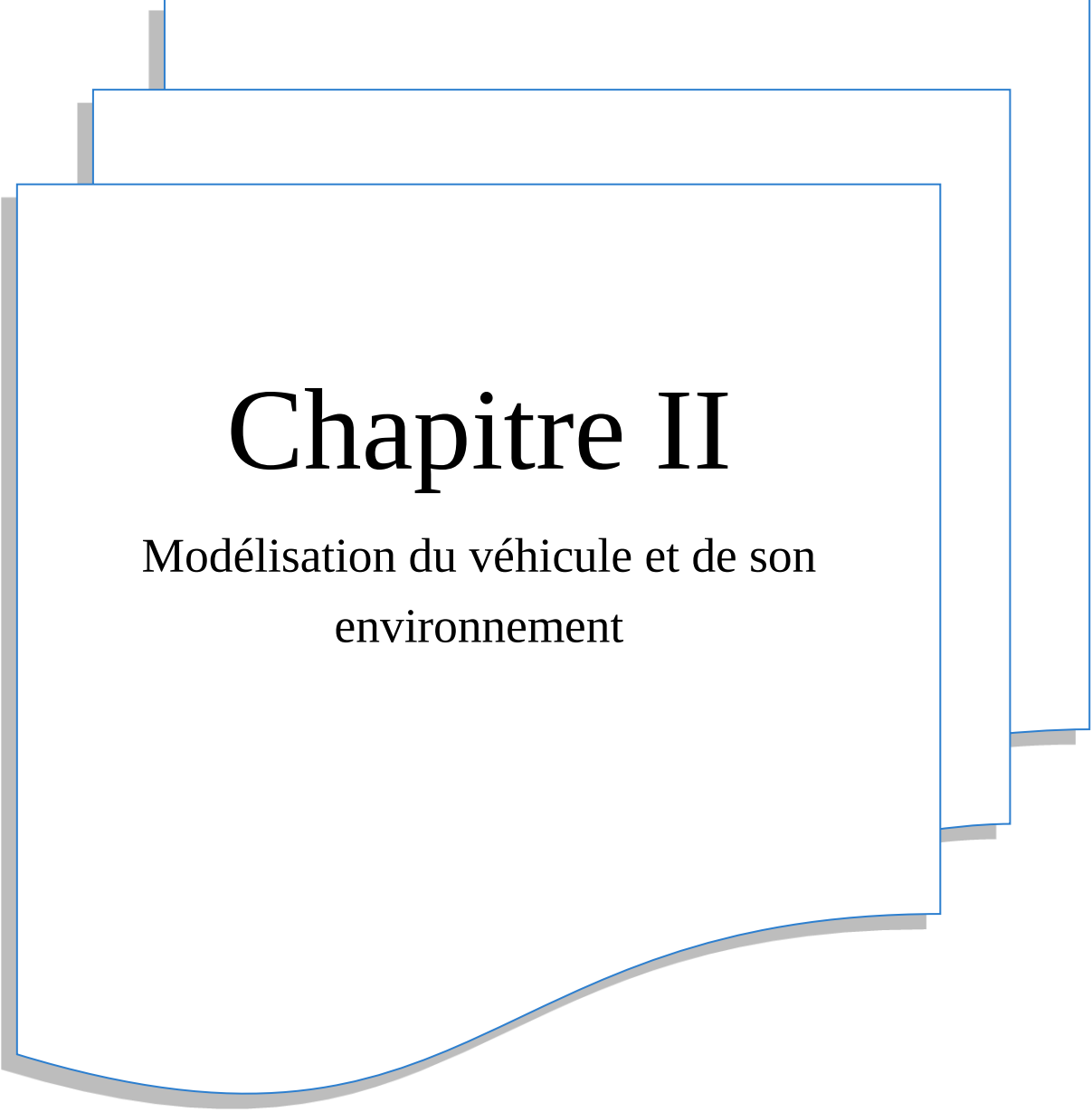
revanche, l'intervention du LDA est dominante quand les bornes de risque sont dépassées et inexistante lorsque le véhicule est proche du centre de la voie.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art des systèmes d'aide à la conduite, en mettant l'accent sur les stratégies d'assistance au contrôle latéral du véhicule. Nous avons également décrit les principaux capteurs et actionneurs embarqués, indispensables à l'assistance du conducteur et à l'amélioration de la sécurité de conduite.

Enfin, la dernière partie a été consacrée à la présentation des principales architectures de systèmes de prévention de sortie de voie, actuellement déployées dans les véhicules modernes.

.



Chapitre II

Modélisation du véhicule et de son
environnement

II.1 Introduction

Un véhicule peut être considéré comme un système mécanique complexe composé de plusieurs sous-ensembles interconnectés par des liaisons, visant à assurer à la fois la mobilité du châssis et le confort des passagers. Il est principalement constitué d'un châssis et d'un système de liaison au sol, comprenant les pneumatiques, les roues, les trains roulants et les systèmes de suspension, qui assurent l'interaction avec l'environnement routier.

II.2 Modélisation de véhicule

Le but de la modélisation est de décrire de manière rigoureuse la dynamique du véhicule dans un repère spatial tridimensionnel, en considérant les déplacements dans le plan de la route (axes x et y) ainsi que la rotation autour de l'axe vertical (axe z) [Sek-13b], [Har-07c].

Dans ce cadre, le modèle du véhicule retenu considère les translations selon x et y et la rotation autour de z , comme illustré à la Figure II.1.

Les forces généralisées F_x , F_y et le moment de rotation totale M_z dans le repère inertiel (X, Y, ψ) sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} M_v \ddot{X} &= F_x \\ M_v \ddot{Y} &= F_y \\ J_v \ddot{\psi} &= M_z \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

A l'aide d'une simple rotation d'un angle ψ autour de l'axe $o\hat{Z}$, on peut évaluer le vecteur de vitesse associé au centre de gravité CG du véhicule

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ r \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Où V_x , V_y sont les vitesses du véhicule dans le plan (x, y) , et $r = \dot{\psi}$ est sa vitesse de lacet.

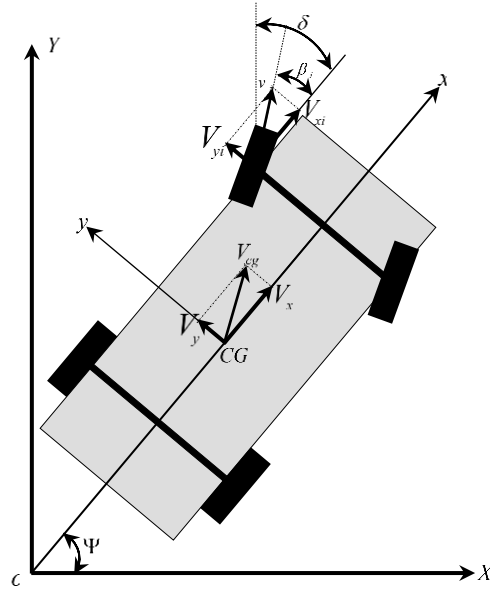


Figure. II.1 Mouvement du véhicule dans le système d'axes (X, Y)

En dérivant (II.1) par rapport au temps, on obtient les accélérations :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}(\dot{X}) &= \dot{V}_x \cos(\psi) - V_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{V}_y \sin(\psi) - V_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\
 \frac{d}{dt}(\dot{Y}) &= \dot{V}_x \sin(\psi) + V_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{V}_y \cos(\psi) - V_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\
 \frac{d}{dt}(\dot{\psi}) &= \dot{r}
 \end{aligned} \tag{II.2}$$

En dérivant les relations cinématiques (II.2), on obtient les accélérations dans le repère inertiel, incluant les effets de rotation via . En substituant ces expressions dans les équations dynamiques (II.1), on obtient les relations (II.3) :

$$\begin{aligned}
 \frac{F_x}{M_v} &= (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \cos(\psi) - (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \sin(\psi) \\
 \frac{F_y}{M_v} &= (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \sin(\psi) + (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \cos(\psi) \\
 \frac{M_z}{J_v} &= \dot{r}
 \end{aligned} \tag{II.3}$$

En substituant l'équation (II.1) dans (II.3), on obtient les expressions des accélérations au centre de gravité (CG) du véhicule comme il est montré sur (II.4) :

De manière analogue à la direction longitudinale (axe x), la résultante des forces selon la direction latérale (axe y) s'écrit :

$$F_y = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) + 0.5 \rho S_f C_{py} v_y^2 + M_v g \sin(\alpha_p) \quad (\text{II.6})$$

Où $M_v g \sin(\alpha_p)$ est la force due à la pente transversale α_p de la route.

Le moment résultant des forces autour de l'axe vertical (axe z), également appelé moment de lacet, est donné par la relation suivante :

$$M_z = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) x_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{ai} + 0.5 \rho S_f C_{M_z} v^2 \quad (\text{II.7})$$

Les variables x_i et y_i représentent les coordonnées des centres des surfaces de contact des roues avec le sol.

En substituant les équations (II.5), (II.6) et (II.7) dans l'équation (II.4), on obtient les expressions finales des équations du mouvement :

$$\begin{cases} M_v (\dot{V}_x - r V_y) = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) - \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) - 0.5 \rho S_f C_{px} V_x^2 - M_v g \sin(\alpha_p) \\ M_v (\dot{V}_y + r V_x) = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) - 0.5 \rho S_f C_{py} V_y^2 + M_v g \sin(\alpha_p) \\ J_v \dot{r} = \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \sin(\delta_i) x_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \cos(\delta_i) x_i - \sum_{i=0}^4 F_{xi} \cdot \cos(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 F_{yi} \cdot \sin(\delta_i) y_i + \sum_{i=0}^4 M_{ai} + 0.5 \rho S_f C_{M_z} V^2 \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En tenant compte de la Figure II.2 et après des simples manipulations mathématiques, on peut aboutir aux équations dynamiques suivantes :

$$\begin{cases} M_v (\dot{V}_x - r \dot{V}_y) = (F_{x1} + F_{x3}) \cos(\delta) + F_{x2} + F_{x4} - (F_{R1} + F_{R3}) \cos(\delta) - F_{R2} - F_{R4} - (F_{y1} + F_{y3}) \sin(\delta) - F_{aero} - F_{pente} \\ M_v (\dot{V}_y + r \dot{V}_x) = (F_{x1} + F_{x3}) \sin(\delta) - (F_{R1} + F_{R3}) \sin(\delta) + F_{y1} + F_{y2} + F_{y1} + F_{y3} - (F_{y1} + F_{y3}) \sin(\delta) \\ J_v \dot{r} = L_f (F_{y1} + F_{y3}) - L_r (F_{y2} + F_{y4}) + d [(F_{x1} - F_{x3}) \cos(\delta) + F_{x2} - F_{x4} + (F_{R3} + F_{R1}) \cos(\delta) - F_{R2} + F_{R4}] \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où F_{yi} et F_{xi} les forces latérales et longitudinales respectivement.

II.3 La colonne de direction assistée électrique

Comme nous le verrons dans les prochains chapitres, les commandes développées seront implantées sur un véhicule équipé d'une colonne de direction classique mais mue par un moteur électrique. La colonne de direction est donc au final le système qui transforme un angle de braquage du volant ou du moteur, dans le mode assistance active, en un angle de braquage des roues. Nous supposons donc l'existence d'un lien mécanique entre le volant et les roues avant directrices. Dans cette section, le modèle utilisé pour la synthèse de la loi de commande peut être plus simple. À titre d'exemple, nous pouvons considérer, comme sur la Figure (II.3), que la colonne de direction est composée d'un arbre unique. Cette hypothèse permet de formuler la dynamique de la colonne comme un système linéaire du second ordre schématisé sur la Figure (II.4).

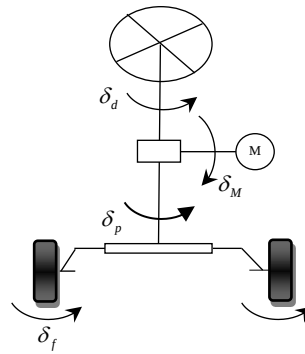


Figure. II.3 Modèle réduit de la colonne de direction

La représentation d'état de ce modèle est la suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_d \\ \ddot{\delta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_s}{I_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_s} & \frac{1}{I_s} & -\frac{1}{I_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_c \\ C_{at} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\delta_f = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix}$$

Les entrées de ce modèle sont le couple conducteur C_c , le couple d'assistance C_a et le couple d'auto-alignement C_{at} . Le couple d'auto-alignement peut être modélisé comme le produit de la chasse géométrique η_t et de la force latérale sur les roues avant $F_f = -2C_y \left(\beta + \frac{L_f}{V_x} r - \delta_f \right)$.

L'expression obtenue au niveau du volant est :

$$C_{at} = -\frac{2k_m C_y \eta_t}{R_s} \left(\beta + \frac{L_f}{V_x} r - \delta_f \right) \quad (\text{II.10})$$

Ou

$$T_{SB} = \frac{2k_m C_y \eta_t}{R_s}, \quad T_{Sr} = \frac{2k_m C_y \eta_t}{R_s} \frac{L_f}{V_x}$$

Le paramètre R_s est le rapport de réduction de la direction et I_s représente le moment d'inertie de la colonne de direction et k_m est le gain de direction manuelle.

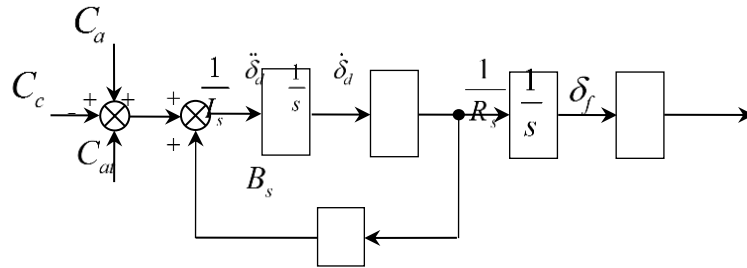


Figure. II.4 Modèle de la colonne de direction pour la synthèse des lois de commande.

III.4 Linéarisation du modèle du véhicule

Afin d'utiliser une stratégie de commande linéaire, le modèle non linéaire du véhicule doit être linéarisé autour d'un point de fonctionnement, permettant ainsi d'obtenir un modèle simplifié adapté à la conception de la commande.

En se focalisant sur la dynamique latérale, cette section présente le modèle de véhicule utilisé pour la synthèse de l'assistance. Ce modèle est obtenu en considérant le véhicule comme un corps rigide qui ne subit aucune déformation et qui présente ainsi six degrés de liberté : trois rotations de la caisse et trois mouvements de translation (Figure II.5) [Raj-06]. Les mouvements

de translations s'effectuent selon trois axes : un axe longitudinal CGX, un axe transversal CGY, et un axe orthogonal CGZ. Les mouvements de rotation s'effectuent selon les axes mentionnés précédemment et portent chacun un nom bien spécifique : la rotation de roulis caractérisée par l'angle (ϕ), la rotation de tangage caractérisée par l'angle (θ), et la rotation de lacet (ou de cap) caractérisée par l'angle (ψ).

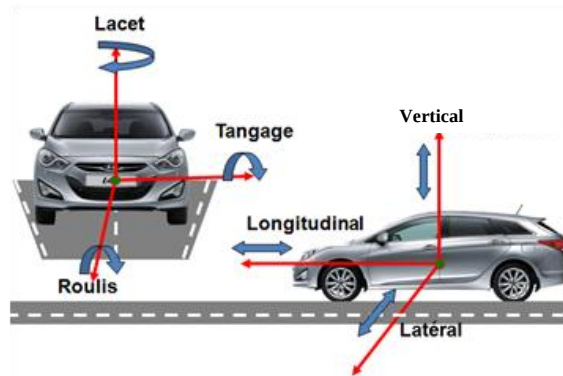


Figure.III.5 Les différents mouvements de véhicule

Pour obtenir un modèle linéaire exploitable dans la synthèse de l'assistance, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [Raj-06]

- Le véhicule est considéré comme un corps rigide qui roule sur une route approximativement plane horizontale, ce qui permet de négliger le mouvement de translation vertical et la rotation de roulis et de tangage ($\theta = 0$ et $\phi = 0$) (les dynamiques de suspensions des roues sont complètement négligées).
- Nous considérons la symétrie du véhicule par rapport au plan XZ, ce qui permet de réduire le modèle à un modèle de deux roues conduisant ainsi au modèle «bicyclette ».
- Pour les angles faibles (ζ), nous considérons l'approximation : $\cos(\zeta)=1$ et $\sin(\zeta)=\zeta$. Cette hypothèse est bien justifiée sur les autoroutes dont la courbure est faible.
- Les dynamiques longitudinales et latérales sont découplées, et la vitesse longitudinale du véhicule V_x reste approximativement constante. Les lois fondamentales de la dynamique sont formulées en considérant les forces de contact pneumatique-chaussée (F_{yf} , F_{yr}) comme les forces extérieures principales qui permettent de transmettre les forces agissant sur le volant au sol et ainsi assurer les différents mouvements du véhicule (Figure III.6).

Les simplifications supplémentaires précédentes permettront de retenir les seuls mouvements de lacet et de dérive, et d'aboutir ainsi aux équations du modèle « bicyclette ».

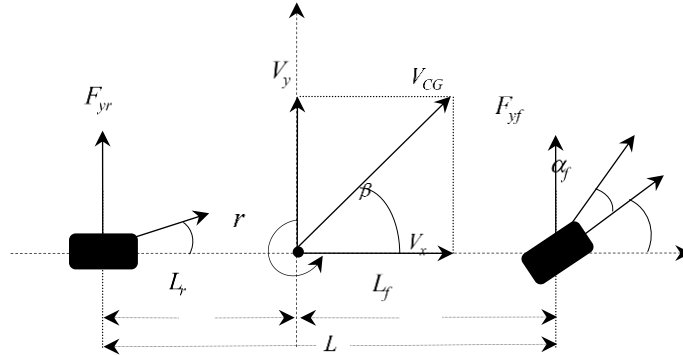


Figure.III.6 Modèle bicyclette

Sur la Figure (III.6), (V_x, V_y) sont les vecteurs de vitesse du véhicule. L_f et L_r sont les distances de centre de gravité CG à l'essieu avant et arrière respectivement. Les forces de contact pneumatique-chaussée sont décrites par les lois de Coulomb qui précisent que la résultante des efforts de frottement F est une force tangentielle qui s'oppose à la vitesse de glissement V_{gliss} (Figure III.7), et que son module est inférieur ou égal à la force normale au point d'application multipliée par un facteur μ appelé adhérence. L'adhérence est une variable difficilement mesurable, elle est fonction du revêtement routier, du pneumatique et surtout des conditions climatiques. μ varie entre 0 et 1. Lorsque l'adhérence est proche de 1, le contact entre le pneumatique et la chaussée est très bon. La chaussée est alors sèche avec de bons pneumatiques. Une adhérence comprise entre 0.5 et 0.6 correspond au déplacement du véhicule sur une chaussée humide ou légèrement mouillée. Lorsque la valeur atteint 0.2 ou 0.3, la chaussée est très glissante, en dessous, la route est verglacée [Rah-04]

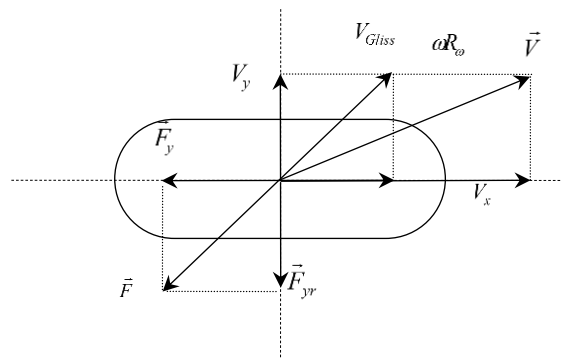


Figure.III.7 Forces au niveau du contact pneu/chaussée

La vitesse du véhicule au point de contact pneu/chaussée n'est pas forcément dans l'axe du pneumatique. La composante latérale de la vitesse V_y génère une force qui lui est opposée d'après la loi de Coulomb. Cette force latérale peut être exprimée linéairement dans le cas où l'angle de dérive $\alpha = \arctan(V_y/V_x)$ n'est pas très important (régime linéaire). Des relevés expérimentaux de contact entre le pneumatique et la chaussée montrent l'existence de trois zones différentes comme présente la Figure III.8 [Rah-04]

- une zone de pseudo-glissement linéaire lors d'une conduite normale sur une ligne droite ou un virage non serré ;
- une zone de pseudo-glissement et glissement. Ici le véhicule reste contrôlable et le pneumatique est utilisé dans la limite de ses capacités ;
- une zone de glissement total où la force de contact est saturée et le véhicule perd de sa manoeuvrabilité.

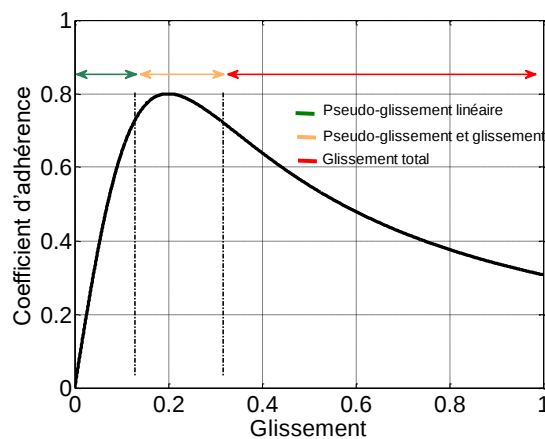


Figure.III.8 Forme de la courbe d'adhérence

Le cadre de l'application à l'assistance au contrôle latéral correspond à une conduite s'inscrivant dans la zone de pseudo-glissement linéaire. La courbe est assimilable à sa tangente à l'origine dont l'expression est la suivante :

$$F_y = C_y \alpha \quad (\text{II.11})$$

C_y est la tangente à l'origine. Ce coefficient modélise la raideur du pneumatique. Il dépend du pneumatique et de la force normale appliquée. Cette formulation des efforts de contact pneu/chaussée est intéressante dans la mesure et constitue une expression linéaire de la force qui peut être utilisée dans les modèles de synthèse de lois de commande. Elle reste valable pour des faibles valeurs de α .

Alors, les expressions des forces latérales résultant F_{yi} pour les petites α_i est donné par l'équation suivante :

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{yf} \alpha_f \\ F_{yr} = C_{yr} \alpha_r \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les angles de dérive α_f et α_r sont décrits en fonction des paramètres cinématiques du véhicule :

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \arctan\left(\frac{V_y + L_f r}{V_x}\right) \approx \delta_f - \frac{V_y + L_f r}{V_x} \\ \alpha_r = -\arctan\left(\frac{V_y + L_r r}{V_x}\right) \approx -\frac{V_y + L_r r}{V_x} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

δ_f est l'angle de braquage des roues avant, et $r = \dot{\psi}$ est la vitesse de lacet.

On a

$$\begin{aligned} M_v (\dot{V}_y + V_x r) &= F_{yr} + F_{yf} - K_y \cdot V_y \cdot |V_y| + F_w \\ \Rightarrow M_v (\dot{V}_y + V_x r) &= 2C_{yf} \alpha_f + 2C_{yr} \alpha_r - K_y \cdot V_y \cdot |V_y| + F_w \\ \Rightarrow M_v (\dot{V}_y + V_x r) &= 2C_{yf} \left(\delta_f - \frac{V_y + L_f r}{V_x} \right) + 2C_{yr} \left(-\frac{V_y + L_r r}{V_x} \right) - K_y \cdot V_y \cdot |V_y| + F_w \quad (\text{III.14}) \\ \Rightarrow \dot{V}_y &= -2 \frac{C_{yf} + C_{yr}}{M_v V_x} v_y + \left(2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{M_v V_x} - v_x \right) + \frac{2C_{yf}}{M_v} \delta_f + \frac{1}{M_v} F_w \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}
 J_v \dot{r} &= L_f F_{yf} - L_r F_{yr} + L_w F_w \\
 \Rightarrow J_v \dot{r} &= 2L_f C_{yf} \alpha_f + 2L_r C_{yr} \alpha_r + L_w F_w \\
 \Rightarrow J_v \dot{r} &= 2L_f C_{yf} \left(\delta_f - \frac{V_y + L_f r}{V_x} \right) + 2L_r C_{yr} \left(-\frac{V_y + L_r r}{V_x} \right) + L_w F_w \\
 \Rightarrow \dot{r} &= \left(2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{J_v V_x} \right) V_y - \left(2 \frac{C_{yf} L_f^2 + C_{yr} L_r^2}{J_v V_x} \right) r + \frac{2C_{yf} L_f}{J_v} \delta_f + \frac{L_w}{J_v} F_w
 \end{aligned} \tag{III.15}$$

En choisissant r et V_y comme variables d'état, le modèle bicyclette peut être écrit :

$$\dot{x} = Ax + Bu + WF_w \quad x = [V_y \ r]^T \quad u = \delta_f$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_{yf} + C_{yr}}{M_v V_x} & 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{M_v V_x} - V_x \\ 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{J_v V_x} & -2 \frac{C_{yf} L_f^2 + C_{yr} L_r^2}{J_v V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_{yf}}{M_v} \\ \frac{2C_{yf} L_f}{J_v} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_v} \end{bmatrix} M_z + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_v} \\ \frac{l_w}{J_v} \end{bmatrix} F_w \tag{III.16}$$

En définissant l'angle de dérive de véhicule (β) comme l'angle entre le cap de véhicule et le vecteur de vitesse $\beta = \arctan(V_y/V_x)$, on peut réécrire le modèle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \frac{C_{yf} + C_{yr}}{M_v V_x} & 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{M_v V_x^2} - 1 \\ 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{J_v V_x} & -2 \frac{C_{yf} L_f^2 + C_{yr} L_r^2}{J_v V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_{yf}}{M_v V_x} \\ \frac{2C_{yf} L_f}{J_v} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_v} \end{bmatrix} M_z + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_v V_x} \\ \frac{l_w}{J_v} \end{bmatrix} F_w \tag{III.17}$$

II.5 Élaboration du modèle global véhicule-route (VR)

Après le développement de modèle latéral linéaire de véhicule, il est désormais possible d'élaborer un modèle global (VR) pour l'ensemble du système véhicule-route, afin de l'utiliser pour la synthèse de contrôleur. Le modèle VR sera obtenu en augmentant le modèle véhicule par le modèle de la colonne de direction et le système de vision, on trouve le modèle VR suivant :

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fw \tag{II.18}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi}_L \\ \dot{Y}_L \\ \dot{\delta}_d \\ \ddot{\delta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_x & l_s & V_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \psi_L \\ Y_L \\ \delta_d \\ \dot{\delta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0_L \\ 0 \\ 1/J_v \end{bmatrix} C_a + \begin{bmatrix} h_1 & 0 \\ h_2 & 0 \\ 0 & -V_x \\ 0 & -l_s V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z \\ \rho_{ref} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

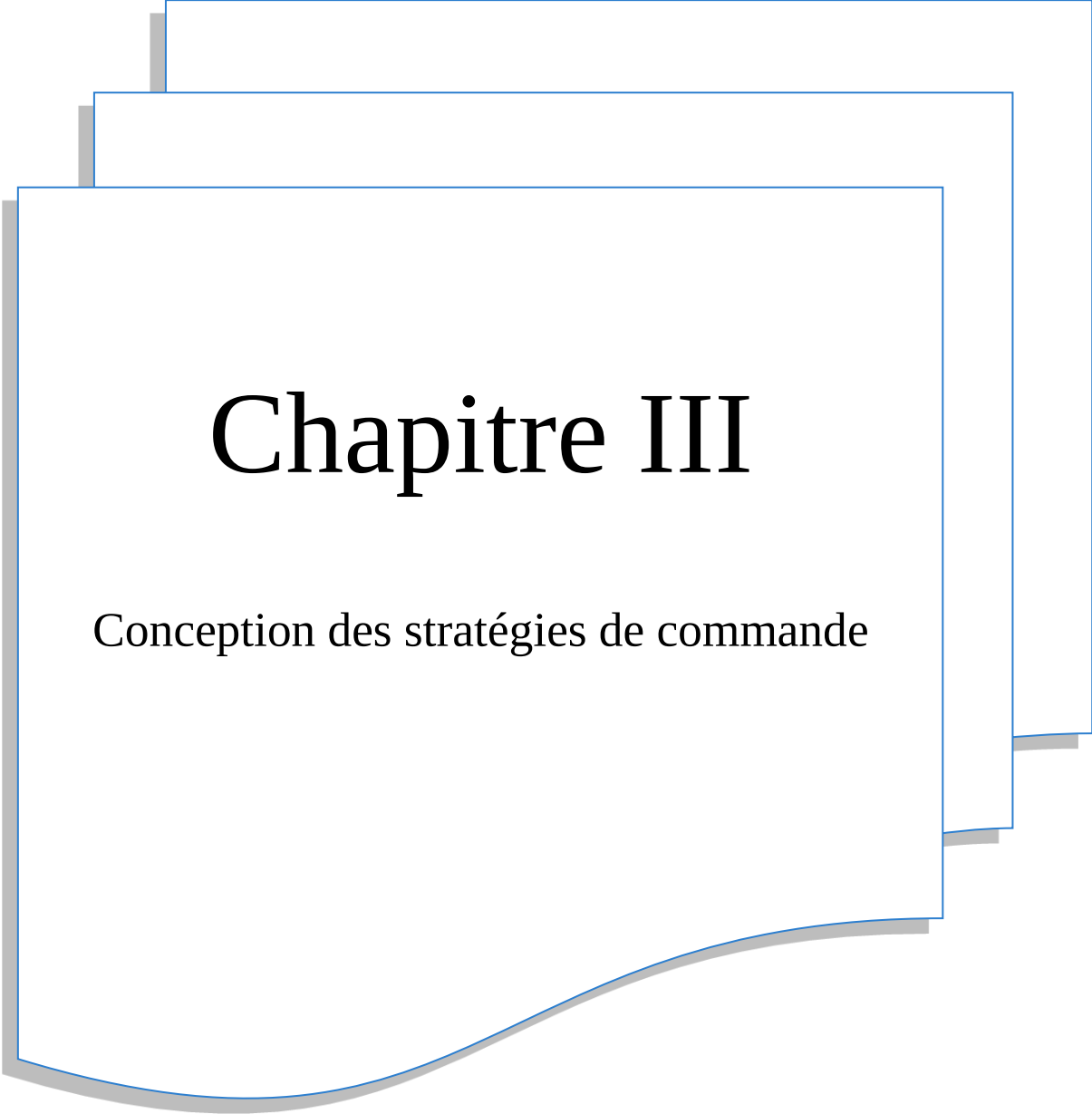
$$a_{11} = -2 \frac{C_{yf} + C_{yr}}{M_v V_x}, \quad a_{12} = 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{M_v V_x^2} - 1, \quad a_{21} = 2 \frac{-C_{yf} L_f + C_{yr} L_r}{J_v}, \quad a_{22} = -2 \frac{C_{yf} L_f^2 + C_{yr} L_r^2}{J_v V_x}$$

$$e_1 = 2 \frac{C_{yf}}{M_v V_x}, \quad e_2 = 2 \frac{C_{yf} L_f}{I_z}, \quad a_{15} = \frac{e_1}{R_s}, \quad a_{25} = \frac{e_2}{R_s}, \quad a_{61} = \frac{T_{sb}}{J_v}, \quad a_{62} = \frac{T_{sr}}{J_v}, \quad a_{65} = -\frac{T_{sb}}{R_s J_v}, \quad a_{66} = -\frac{B_s}{J_v}$$

II.6 conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation dynamique du véhicule et de son environnement, en décrivant les mouvements dans le plan (x, y) ainsi que la dynamique de lacet. Nous avons également introduit le modèle de la colonne de direction assistée électrique, permettant de représenter l'action de commande sur le véhicule.

Par la suite, une étape de linéarisation du modèle du véhicule a été réalisée afin d'obtenir une représentation adaptée à la synthèse des lois de commande. Enfin, l'ensemble des éléments a été intégré pour construire le modèle global véhicule–route (VR).



Chapitre III

Conception des stratégies de commande

III.1. Introduction

Les avancées technologiques de ces dernières années ont favorisé l'émergence des véhicules intelligents capables de détecter et de compenser des défaillances (du conducteur, du véhicule ou de l'infrastructure), voire d'assurer une conduite autonome.

Au cours des dernières années, de nombreux travaux de recherche ont été consacrés au guidage latéral automatique des véhicules autonomes, donnant lieu à plusieurs stratégies de commande développées dans la littérature.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'architecture de commande optimale permettant d'assurer le suivi de trajectoire du véhicule, en maintenant une erreur latérale acceptable entre le centre de gravité du véhicule et le centre de la voie.

III.2 la commande linéaire quadratique

Les problèmes de commande optimale se rencontrent fréquemment en pratique, notamment lorsqu'il s'agit de minimiser un coût (temps, énergie, effort de commande, etc.) pour un système dynamique donné. Lorsque le modèle du système est connu, le problème consiste à déterminer une loi de commande minimisant un critère de performance.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux systèmes linéaires associés à un critère quadratique, connus sous le nom de commande linéaire quadratique (LQ ou LQR — Linear Quadratic Regulator). Dans ce cadre, la commande optimale est généralement exprimée sous forme d'un retour d'état.

De nombreuses méthodes de commande reposent sur ce principe, telles que la commande optimale ou le placement de pôles. L'objectif est de déterminer une loi de commande assurant un positionnement adéquat des pôles du système en boucle fermée, garantissant stabilité, rapidité et précision. Les pôles étant les valeurs propres de la matrice d'état, la commande agit ainsi sur la dynamique globale du système [Lar-96].

III.2.1 Régulateur linéaire quadratique

On considère un système linéaire continu invariant dans le temps, décrit par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \\ y(t) = C.x(t) \end{cases} \quad x(t_0) = x_0 \quad (III.1)$$

où x est le vecteur d'état, u le vecteur de commande, y le vecteur de sortie, et x_0 l'état initial. Les matrices A , B et C représentent respectivement la dynamique, l'entrée et la sortie du système.

La synthèse LQR consiste à déterminer un gain de retour d'état K tel que la commande :

$$u = -Kx \quad (III.2)$$

stabilise le système et minimise un critère quadratique [Lar-96-10], et [Ous-95] :

$$J = \int_0^{\infty} (x^T.Q.x + u^T.R.u) dt \quad (III.3)$$

où les matrices de pondération Q et R sont symétriques définies positives :

$$Q = Q^T \geq 0 \quad R = R^T > 0 \quad (III.4)$$

Le gain optimal K est donné par :

$$K = -R^{-1}.B^T.P \quad (III.5)$$

où P est la solution de l'équation algébrique de Riccati :

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (III.6)$$

III.2.2 Choix des matrices de pondération

La synthèse des matrices de gain du contrôleur optimal, repose directement sur les matrices de pondération Q et R . On peut trouver dans la littérature deux méthodes pour les choisir. La première méthode est la règle de Bryson [Oli-94] qui suggère de choisir des matrices de pondération diagonales, dont les coefficients diagonaux sont égaux au carré de l'inverse de produit entre l'écart maximum souhaité sur la variable correspondante et le période

d'échantillonnage. Bryson [Oli-94] indique également que cette règle ne fournit que des valeurs initiales, que l'on peut ensuite améliorer par simulations successives. La règle de Bryson donne :

$$Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad \text{et} \quad R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_m) \quad (\text{III.7})$$

Avec

$$r_i = \left[\frac{1}{\sup(u_i)} \right]^2, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{et} \quad q_i = \left[\frac{1}{\sup(y_i) \cdot T_s} \right]^2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Dans la deuxième méthode, les pondérations peuvent être choisies symétriques. Elles sont généralement choisies diagonales. Ainsi, on se ramène au choix de n scalaires pour l'état et de m scalaires pour la commande. Il est intéressant de remarquer d'abord que la multiplication des pondérations Q et R par un même scalaire laisse inchangé le gain K . Voici une méthode simple de choix et de modification des pondérations en vue d'aboutir à un correcteur satisfaisant.

1. Au départ, on choisit généralement des pondérations égales aux matrices identité.
2. Dans une seconde étape, on accélère ou décélère globalement le système en multipliant la matrice Q par un scalaire λ_Q (accélération avec $\lambda_Q > 1$ et décélération avec $\lambda_Q < 1$), jusqu'à obtenir une dynamique moyenne adaptée.
3. Dans le cas où certains états auraient des dynamiques trop lentes par rapport à d'autres, on peut choisir d'augmenter la pondération de Q correspondant aux premiers.
4. Dans le cas où certains actionneurs seraient trop sollicités par rapport à d'autres, on peut choisir d'augmenter la pondération de R leur correspondant. Les étapes 2, 3 et 4 peuvent être répétées dans l'ordre souhaité jusqu'à obtenir un correcteur satisfaisant le cahier des charges.

III.3 Commande linéaire quadratique stochastique à horizon fini (FHS-LQR)

Dans les conditions réelles de conduite, le comportement du véhicule est influencé par plusieurs facteurs non idéalisés, notamment le délai de commande, les incertitudes paramétriques et les perturbations externes latérales. Le délai de commande provient des actionneurs et des temps de calcul, introduisant un décalage entre la commande calculée et celle effectivement appliquée. Par ailleurs, les paramètres du modèle, tels que la masse, les rigidités ou les coefficients aérodynamiques, sont souvent incertains. Enfin, des perturbations latérales, telles que le vent ou la courbure de la route, affectent directement la dynamique du véhicule.

III.3.1 Modélisation des perturbations

Dans un contexte de conduite réelle, la dynamique latérale du véhicule est soumise à diverses sources d'incertitudes susceptibles d'altérer les performances du système de contrôle. Ces incertitudes proviennent principalement :

- des erreurs de modélisation,
- de la saturation des actionneurs,
- du bruit des capteurs,
- et de la variabilité de la géométrie de la route, notamment sa courbure.

Afin de représenter ces effets de manière réaliste, plusieurs termes perturbateurs sont introduits dans le modèle dynamique :

- $\omega A(k)$: incertitude affectant la matrice d'état ,
- $\omega B(k)$: incertitude agissant sur la matrice d'entrée ,
- ρ_{ref} : profil de courbure de la route, correspondant à la trajectoire de référence,
- G : matrice de gain reliant la courbure de la route à l'excitation du système.

L'influence combinée des incertitudes et de la courbure de la route conduit à une formulation augmentée du modèle dynamique, incluant également un retard de commande. Ce modèle s'écrit :

$$x(k+1) = (A + \omega A(k) \cdot A) \cdot x(k) + (B + \omega B(k) \cdot B) \cdot u(k-d) + G \cdot pref \quad (\text{III.8})$$

Dans cette expression :

- le terme $\omega A(k)$ représente une excitation déterministe liée à la courbure de la route,
- contrairement au bruit de processus, $u(k-d)$ est une entrée connue et prédéfinie,
- le retard d modélise le temps de réponse des actionneurs.

L'incertitude $\omega A(k)$ permet de représenter les variations lentes du système, telles que la flexibilité du châssis ou les erreurs de modélisation. Elle est modélisée comme un signal stochastique de basse fréquence combinant des composantes sinusoïdales et un bruit aléatoire.

$$\omega A(k) = \alpha A \cdot [0.2 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.7 \cdot tk) + 0.1 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.4 \cdot tk) + 0.1 \cdot N(0,1) + 0.01 \cdot \text{cumsum}(N(0,1)) \cdot dt] \quad (\text{III.9})$$

Ce modèle permet de reproduire un comportement réaliste caractérisé par :

- des variations lentes (basses fréquences),
- une composante aléatoire gaussienne,
- une dérive progressive simulée par une somme cumulée.

L'incertitude $\omega B(k)$ modélise les perturbations affectant l'action de commande, telles que :

- la saturation des actionneurs,
- la variation de l'efficacité de direction,
- les forces extérieures (vent latéral).

Elle est définie par :

$$\omega B(k) = \sigma B \cdot [0.1 \cdot N(0,1) + 0.3 \cdot \text{square}(2\pi \cdot 0.25 \cdot tk + \varphi) + 0.2 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.5 \cdot tk + \psi)] \quad (\text{III.10})$$

Cette formulation combine :

- un bruit aléatoire,
- une composante périodique discontinue (signal carré),
- une variation sinusoïdale.

En complément des perturbations continues, des perturbations impulsionnelles sont introduites à des instants spécifiques afin de simuler des événements brusques tels que :

- des rafales de vent,
- des actions soudaines du conducteur.

Ces perturbations sont modélisées par :

$$\omega B(30\%) += +0.4 \quad \text{et} \quad \omega B(80\%) -= 0.4 \quad (\text{III.11})$$

L'équation (III.11) indique que la perturbation subit des modifications brusques à des instants précis de la simulation :

- à 30 % du temps de simulation, on ajoute une valeur de à ,
- à 80 % du temps, on soustrait une valeur de .

Autrement dit, n'est pas uniquement un signal continu, mais comporte aussi des sauts instantanés (impulsions) qui modifient brutalement sa valeur à ces instants.

Ces injections ponctuelles permettent de tester la robustesse du système face à des variations rapides et imprévisibles.

III.3.2 Formulation de FHS-LQR

Dans ce cadre, le problème de commande est formulé sur un horizon fini, permettant de mieux prendre en compte les variations temporelles et les perturbations. La fonction de coût associée est définie par :

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [x(k)^T Q_k x(k) + u(k)^T R_k u(k)] + x(N)^T Q_f x(N) \quad (\text{III.12})$$

Contrairement au LQR classique, les matrices de pondération et peuvent être variables dans le temps, afin d'adapter la commande aux conditions dynamiques et aux niveaux de perturbation.

La résolution de ce problème repose sur une équation de Riccati stochastique calculée de manière récursive [Mer-26]. La matrice de coût est obtenue par une récursion arrière :

$$P_k = Q_k + A^T P_{k+1} A + \alpha A^2 A^T P_{k+1} A - A^T P_{k+1} B K_k \quad (\text{III.13})$$

avec la condition terminale :

$$P_N = Q_f$$

Le gain de commande optimal est alors donné par :

$$K_k = [R_k + B^T P_{k+1} B + \sigma B^2 B^T P_{k+1} B]^{-1} \cdot [B^T P_{k+1} A + \sigma B^2 B^T P_{k+1} A] \quad (\text{III.14})$$

Les paramètres et jouent un rôle central dans la formulation stochastique du FHS-LQR, en permettant de modéliser explicitement le niveau d'incertitude du système et d'ajuster le compromis entre performance et robustesse.

Le paramètre est associé aux incertitudes affectant la dynamique du système, c'est-à-dire la matrice . Il traduit les variations des paramètres physiques du véhicule, telles que la masse, les coefficients de rigidité des pneus, ou encore les conditions d'adhérence. Ces variations influencent directement l'évolution des états du système. Ainsi, une valeur élevée de indique une forte incertitude sur le modèle dynamique, ce qui conduit à une augmentation du poids des termes de pénalisation dans l'équation de Riccati, et donc à une commande plus prudente.

Le paramètre α , quant à lui, est lié aux incertitudes sur l'actionnement, représentées par la matrice ΔA . Il modélise les imperfections des actionneurs, telles que les pertes d'efficacité, les phénomènes de saturation ou les délais internes. Une augmentation de α se traduit par une pénalisation accrue de l'effort de commande, limitant ainsi les actions brusques et améliorant la robustesse vis-à-vis des incertitudes d'entrée.

D'un point de vue du contrôle, ces deux paramètres influencent directement :

- la solution de l'équation de Riccati ,
- le gain de retour ,
- et donc le comportement global du système en boucle fermée.

Un choix approprié de α et β permet d'obtenir un compromis optimal entre précision du suivi, effort de commande et robustesse. En pratique :

- des valeurs faibles privilégient la performance mais réduisent la robustesse,
- des valeurs élevées améliorent la robustesse mais peuvent dégrader la réactivité.

Une approche rigoureuse pour déterminer α et β consiste à les relier directement aux bornes d'incertitude du modèle. Cette méthode repose sur l'idée que les matrices réelles du système diffèrent des matrices nominales selon :

$$A_{réel} = A + \Delta A \quad , \quad B_{réel} = B + \Delta B \quad (III.15)$$

où ΔA et ΔB représentent les perturbations inconnues mais bornées.

Afin de quantifier ces incertitudes, on introduit une mesure relative basée sur une norme matricielle :

$$\alpha A \approx \|\Delta A\| / \|A\| \quad , \quad \sigma B \approx \|\Delta B\| / \|B\| \quad (III.16)$$

Cette formulation permet d'interpréter directement les paramètres α et σ comme des taux d'incertitude relatifs. Par exemple, une valeur $\alpha = 0.05$ signifie que la dynamique réelle peut s'écarter de 5 % du modèle nominal.

Les matrices A et B peuvent être obtenues selon plusieurs approches :

1. Variation paramétrique

Les paramètres physiques du véhicule étant souvent connus avec des marges d'incertitude, il est possible de recalculer les matrices A et B pour différents scénarios extrêmes (masse minimale/maximale, variation d'adhérence, etc.). L'écart maximal observé permet alors d'estimer ΔA et ΔB .

2. Simulation de scénarios perturbés

Des simulations intégrant des conditions variées (route sèche/mouillée, vent latéral, variations de charge) permettent d'identifier les écarts de comportement du système et d'en déduire des bornes d'incertitude.

3. Identification expérimentale

Dans un cadre expérimental, les données mesurées peuvent être utilisées pour estimer les matrices du système réel, puis comparer ces résultats au modèle nominal afin d'obtenir $\hat{A}$ et $\hat{B}$.

Finalement, la loi de commande s'exprime sous la forme d'un retour d'état :

$$u(k) = -Kk \cdot x(k) \quad (\text{III.17})$$

Cependant, en raison du délai de commande, la commande réellement appliquée au système est :

$$u_{\text{appliquée}}(k) = u(k - d) \quad (\text{III.18})$$

Cette formulation constitue une extension du LQR classique. En effet, contrairement à ce dernier qui suppose un horizon infini, des paramètres constants et l'absence d'incertitudes, le FHS-LQR permet :

- la prise en compte explicite du délai de commande,
- l'intégration des incertitudes multiplicatives,

- l'adaptation temporelle des pondérations,
- et une meilleure robustesse face aux perturbations.

Ainsi, le FHS-LQR offre une solution plus réaliste et plus performante pour le contrôle des systèmes dynamiques complexes, tels que les véhicules autonomes évoluant dans des environnements incertains.

III.4 Contrôle partagé entre copilote et conducteur

L'architecture générale du système de contrôle latéral partagé est illustrée à la Figure (III.1).

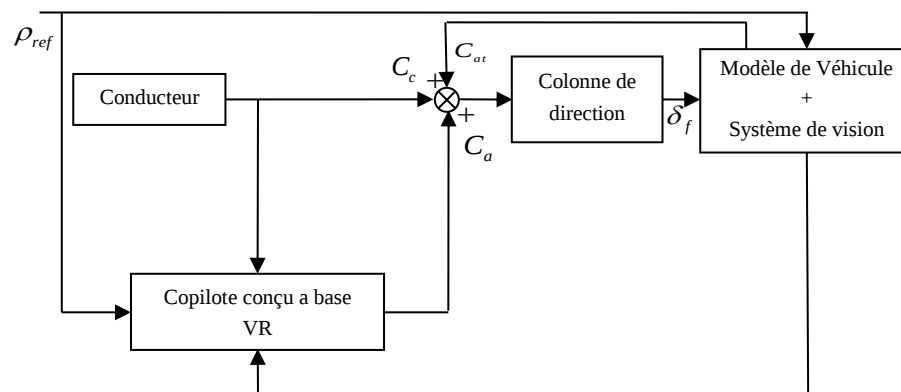


Figure.III.1 Architecteur de Contrôle partagé

Elle repose sur une interaction entre le conducteur humain et un copilote automatisé, agissant conjointement sur la colonne de direction afin d'assurer le suivi de voie.

La stratégie de commande adoptée pour l'assistance au suivi de trajectoire est basée sur une approche optimale et robuste de type LQR ou FHS-LQR, permettant de garantir à la fois performance, stabilité et robustesse face aux incertitudes.

Pour la synthèse de cette loi de commande, on utilise le modèle d'état global véhicule–route (VR), qui intègre la dynamique latérale du véhicule (modèle bicyclette), le système de vision ainsi que la dynamique de la direction. Afin de mieux représenter les conditions réelles de fonctionnement, ce modèle est étendu pour inclure des incertitudes multiplicatives affectant les matrices dynamiques et d'entrée.

Les performances du système d'assistance sont évaluées à l'aide d'un critère quadratique global, intégrant plusieurs objectifs tels que le confort, la sécurité, l'effort de commande et le

niveau de partage. L'optimisation de ce critère revient à minimiser une fonction de coût dépendant du vecteur d'état, choisi de manière à refléter les grandeurs critiques du système.

En particulier, les variables suivantes sont considérées :

En termes de sécurité et de suivi de voie :

- l'erreur d'angle de cap, qui caractérise la capacité d'anticipation du système ;
- l'erreur latérale, qui mesure la précision de positionnement dans la voie ;

En termes de partage et d'effort :

- le couple conducteur, indicateur du niveau d'implication du conducteur ;
- le couple d'assistance, lié à l'acceptabilité et au confort du système.

Avant la synthèse du contrôleur, il est nécessaire de vérifier que le système est contrôlable. En effet, la contrôlabilité garantit que la commande peut influencer l'ensemble des états du système.

Les matrices de pondération et jouent un rôle essentiel dans la synthèse du contrôleur. Elles permettent de pondérer respectivement les états du système et l'effort de commande, et doivent être choisies de manière à assurer un compromis entre performance et robustesse.

Dans ce travail, le choix de ces matrices est réalisé à l'aide de la règle de Bryson, qui consiste à normaliser les variables en fonction de leurs valeurs maximales admissibles. Cette approche permet d'obtenir une initialisation cohérente des pondérations, qui peut être ensuite affinée par simulation.

Les coefficients et représentent les pondérations associées à l'angle de dérive du véhicule et à la vitesse de lacet, tandis que et correspondent aux pénalités sur l'angle de cap relatif et l'erreur de positionnement latéral, respectivement.

Ces coefficients doivent être soigneusement ajustés afin d'obtenir un compromis optimal entre performance et robustesse. Par ailleurs, des valeurs appropriées des coefficients et doivent être choisies afin de limiter les amplitudes de l'angle de braquage ainsi que sa vitesse, évitant ainsi des sollicitations excessives de l'actionneur.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.10^4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15.10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}, R = 0.3 \quad (\text{III.20})$$

Enfin, une fois les matrices A et B déterminées, la matrice de gain K est calculée à l'aide de la commande LQR ou FHS-LQR, permettant de minimiser la fonction de coût et d'obtenir une loi de commande optimale adaptée aux conditions de fonctionnement du système.

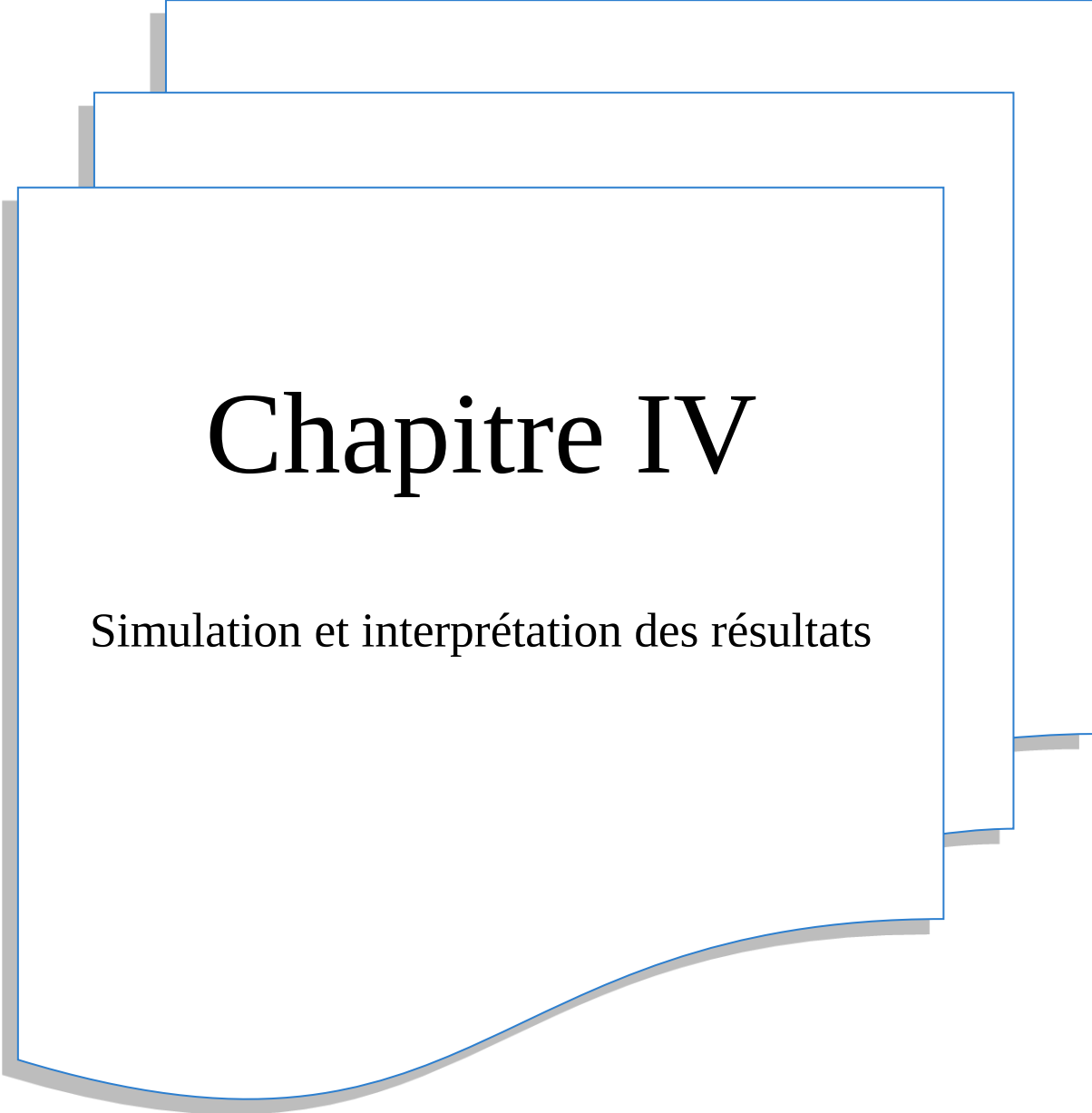
$$K = \begin{bmatrix} 1.8679 & 0.1128 & 1.4246 & 0.1225 & -0.0049 & 0.0009 \end{bmatrix} \times 10^4 \quad (\text{III.21})$$

II.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la conception des stratégies de commande pour le contrôle latéral du véhicule, en s'appuyant sur le modèle global véhicule-route (VR). Dans un premier temps, la commande linéaire quadratique (LQR) a été présentée comme une approche optimale basée sur le retour d'état.

Afin de mieux représenter les conditions réelles de fonctionnement, une extension vers la commande stochastique à horizon fini (FHS-LQR) a été introduite, permettant de prendre en compte les incertitudes paramétriques, les perturbations latérales ainsi que le délai de commande.

Par ailleurs, une architecture de contrôle partagé entre le conducteur et le copilote automatisé a été développée, permettant d'assurer le suivi de voie tout en tenant compte du niveau d'interaction et d'effort du conducteur.



Chapitre IV

Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

La détermination du modèle mathématique véhicule–route (VR) a permis d’établir les équations nécessaires à la mise en œuvre de la phase de simulation, constituant une étape essentielle pour l’évaluation des performances des stratégies de commande proposées.

Le contrôle latéral du véhicule vise à minimiser l’erreur latérale afin d’assurer le suivi de la trajectoire de référence, tout en maintenant une vitesse de lacet et un angle de dérive compatibles avec les exigences de stabilité et de confort.

Dans cette étude, le système considéré est soumis à des incertitudes paramétriques ainsi qu’à un délai de commande, afin de reproduire des conditions de fonctionnement réalistes. Les incertitudes sont introduites sous forme multiplicative sur les matrices du système, tandis que le délai de commande est modélisé par un retard discret sur l’entrée de commande.

Dans ce cadre, deux stratégies de commande sont mises en œuvre : la commande linéaire quadratique (LQR) et sa version avancée, la commande stochastique à horizon fini (FHS-LQR).

IV.2. Les séries de simulations

Dans cette section, deux séries de simulations sont réalisées sur la base du schéma de contrôle présenté à la Figure IV.1. La première série considère le modèle véhicule–route soumis à des incertitudes paramétriques, sans prise en compte du délai de commande, tandis que la seconde intègre, en plus des incertitudes, un délai de commande, afin d’évaluer son impact sur les performances du système.

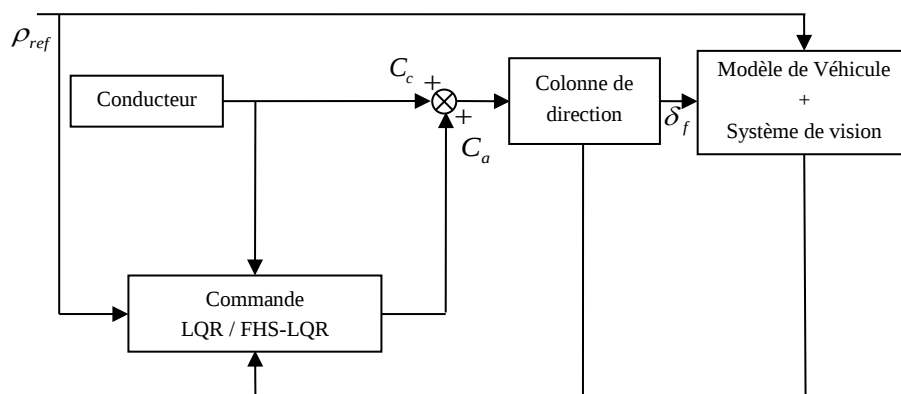


Figure. IV.1 : Schéma bloc du système proposé pour la simulation

Les simulations sont effectuées pour une vitesse longitudinale constante de 80 km/h, en suivant une trajectoire définie par une courbure de route variable (Figure IV.2). Les incertitudes

sont introduites sous forme multiplicative sur les matrices du système, et leurs évolutions temporelles sont illustrées à la Figure IV.3, représentant les perturbations appliquées sur les matrices et .

Par ailleurs, le comportement du conducteur est modélisé selon trois phases d'implication, comme illustré à la Figure IV.4 : une première phase où le conducteur exerce un contrôle total (100 % d'autorité), une deuxième phase correspondant à une implication partielle (50 %), et enfin une troisième phase où le conducteur relâche complètement le contrôle (0 %). Cette modélisation permet d'analyser le partage d'autorité entre le conducteur et le système d'assistance dans différentes conditions d'interaction.

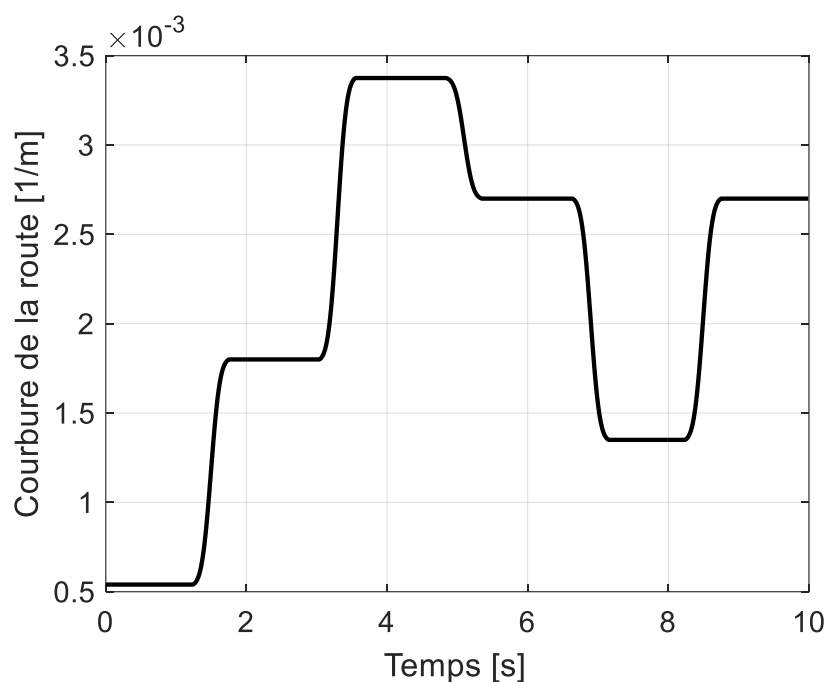


Figure. IV.2 Rayon de courbure de piste d'essai

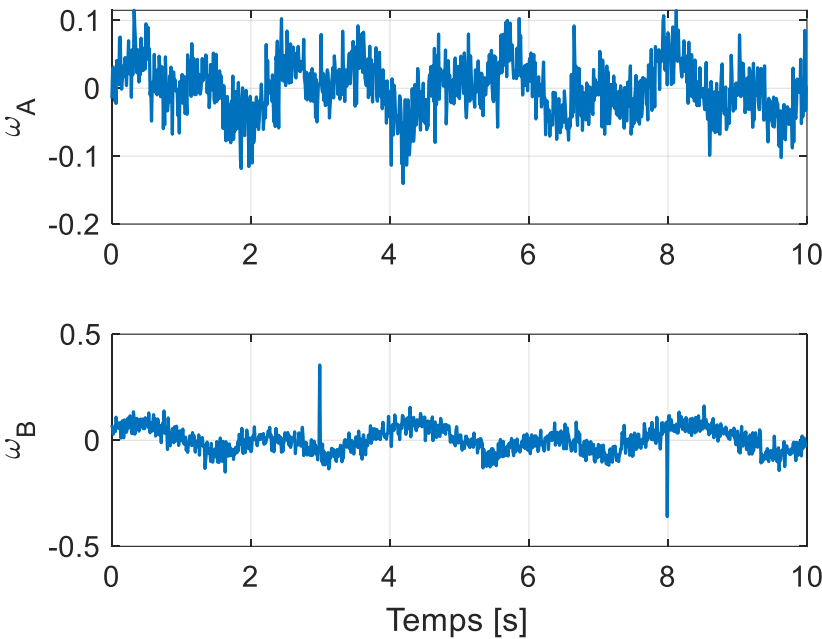


Figure. IV.3 Évolution temporelle des perturbations et

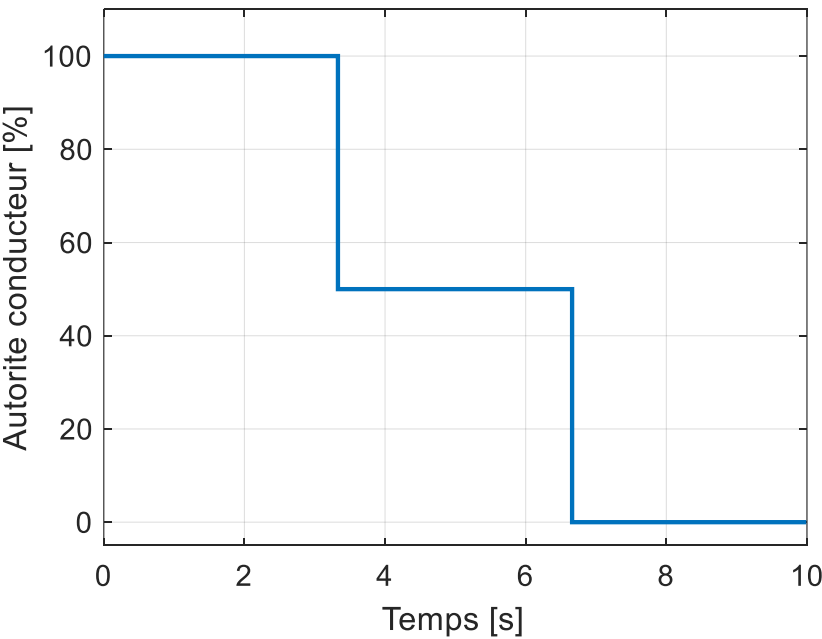


Figure. IV.4 Autorité de conducteur (%)

IV.2.1 Première série

La première série de simulations considère une configuration permettant d'évaluer l'influence des incertitudes paramétriques sur la stabilité du système et les performances de suivi de trajectoire, en l'absence de délai de commande.

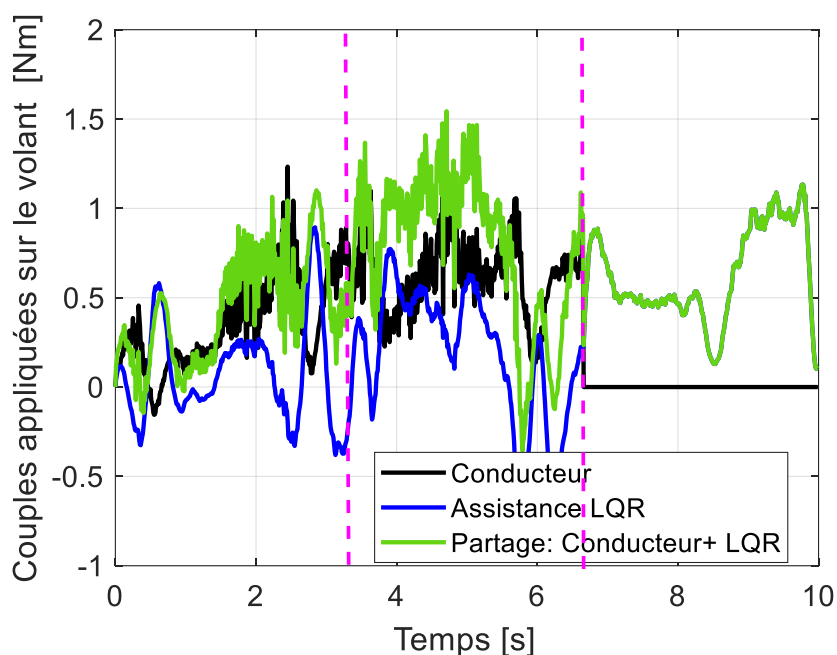


Figure. IV.5 Couples appliqués sur le volant

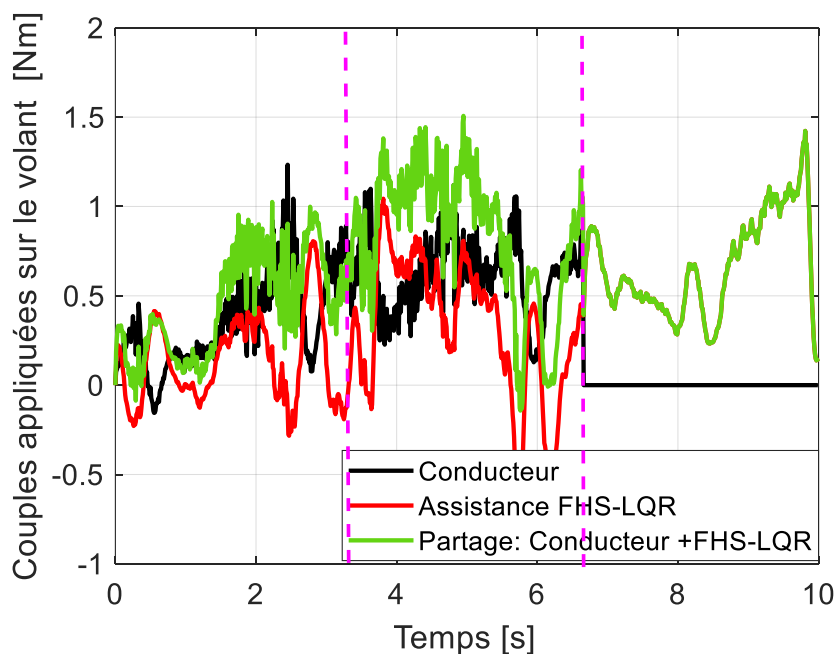


Figure. IV.6 Couples appliqués sur le volant

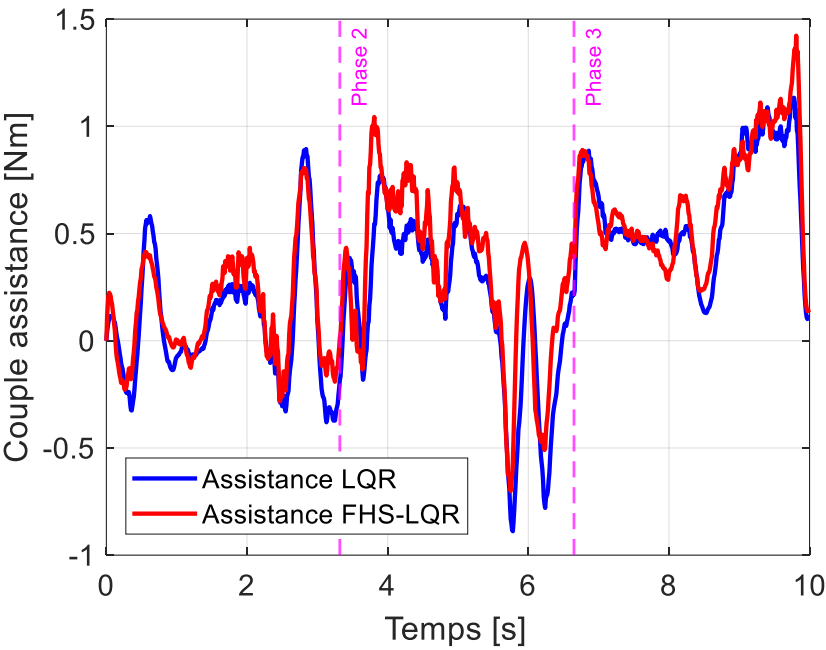


Figure. IV.7 Couples assistances appliquées sur le volant

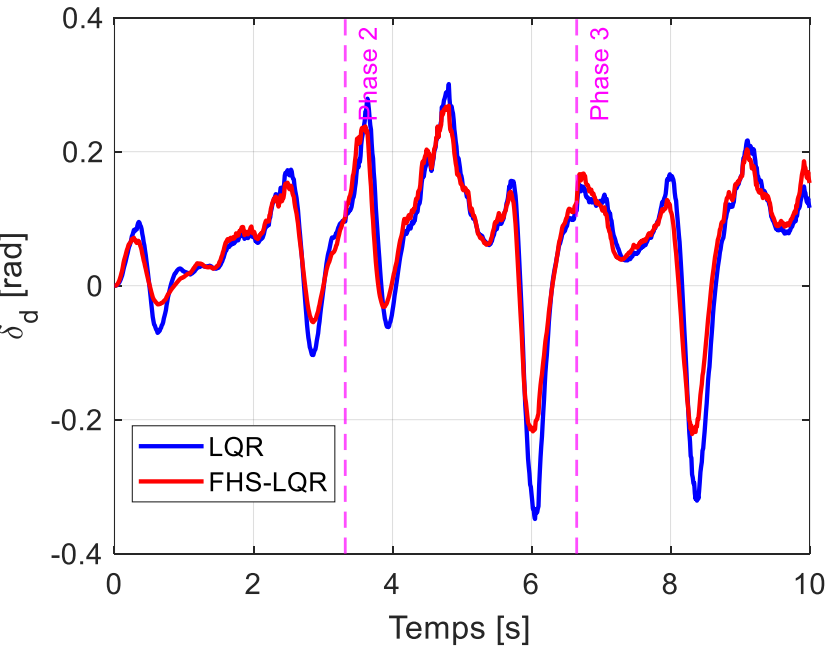


Figure. IV.8 Angle de volant

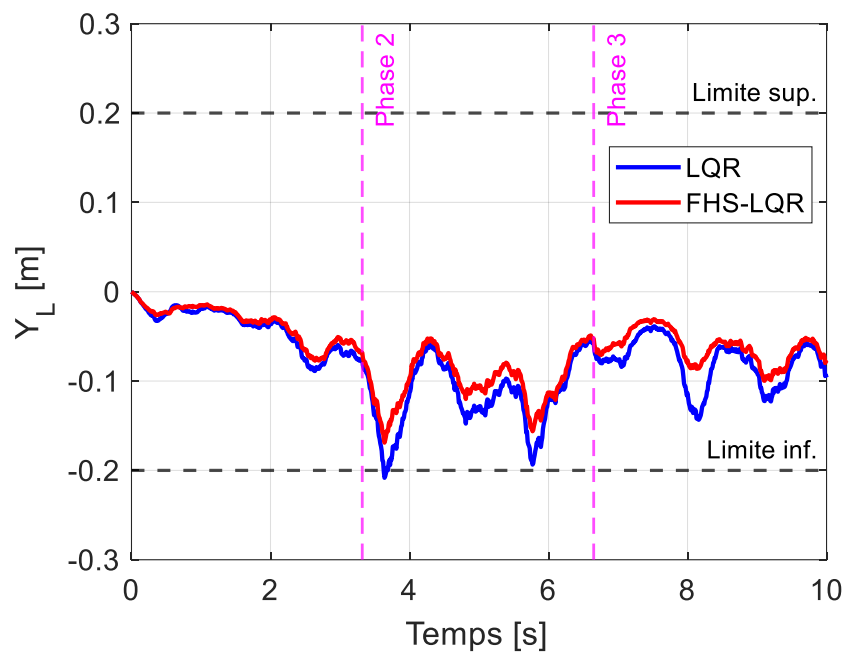


Figure. IV.9 Déplacement latéral

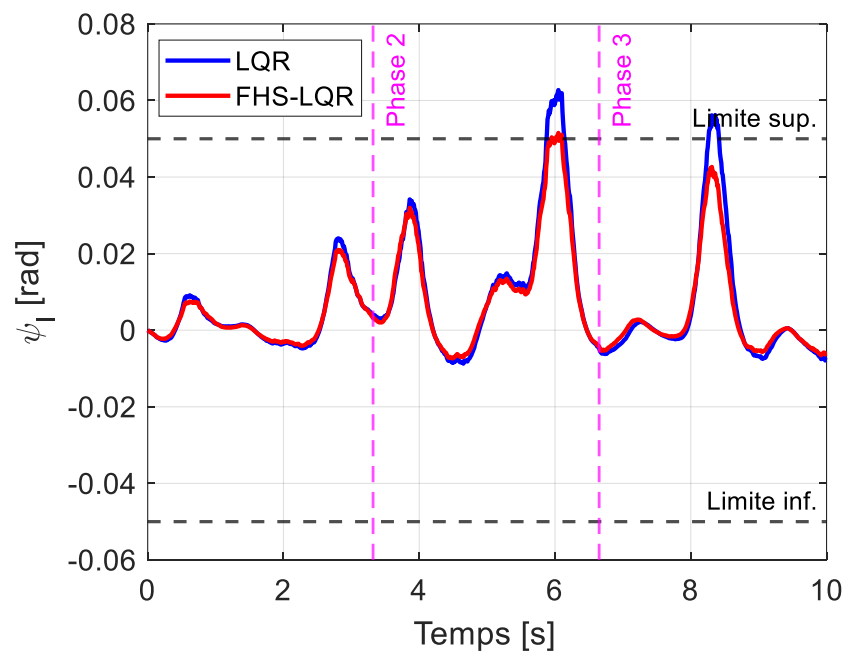


Figure. IV.10 Erreur sur l'angle de cap

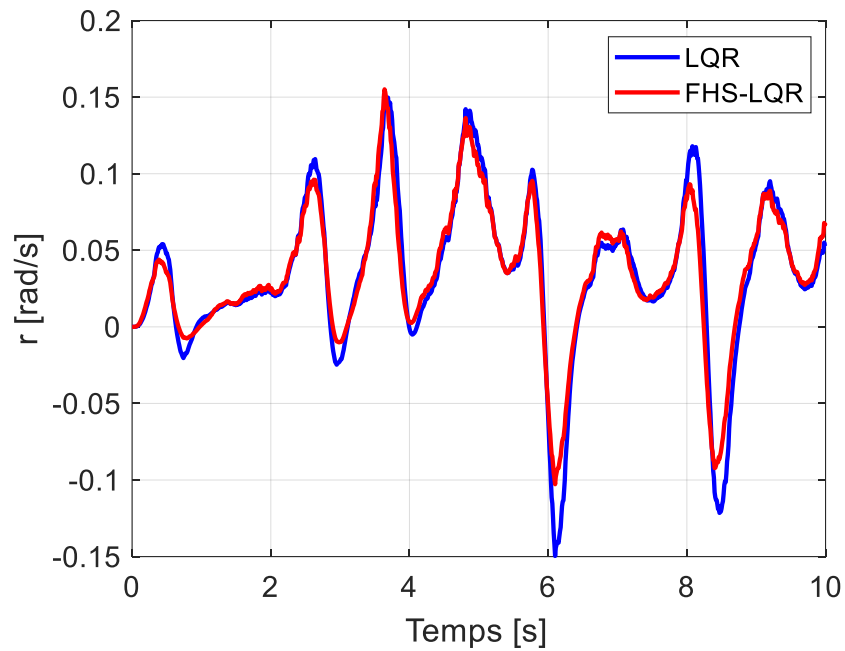


Figure. IV.11. Vitesse de lacet

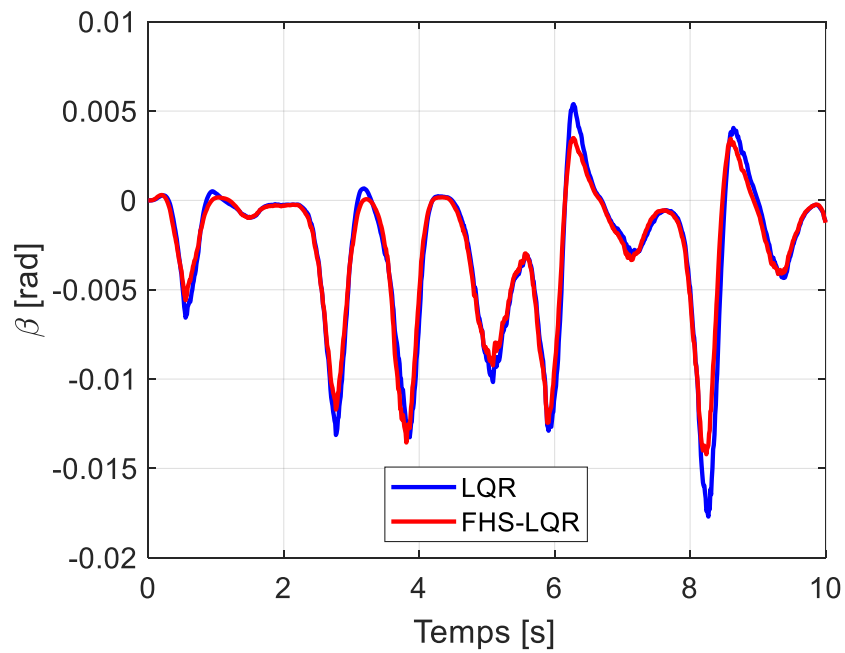


Figure. IV.12 Angle de dérive

Tableau IV.1 Comparaison des performances RMS

Variable	LQR	FHS-LQR	Amélioration (%)
	0.005146	0.004714	08.39
	0.061619	0.055843	09.37
	0.017005	0.014233	16.30
	0.089108	0.073450	17.57
	0.525330	0.470102	10.51

Tableau IV.2 Comparaison des valeurs maximales et coûts de performance

Variable	LQR (MAX)	FHS-LQR (MAX)	Amélioration (%)
Erreur latérale maximale	0.208293	0.168906	18.91
Erreur de cap maximale	0.062733	0.049835	17.85
Accélération latérale maximale	2.236723	1.893853	15.33

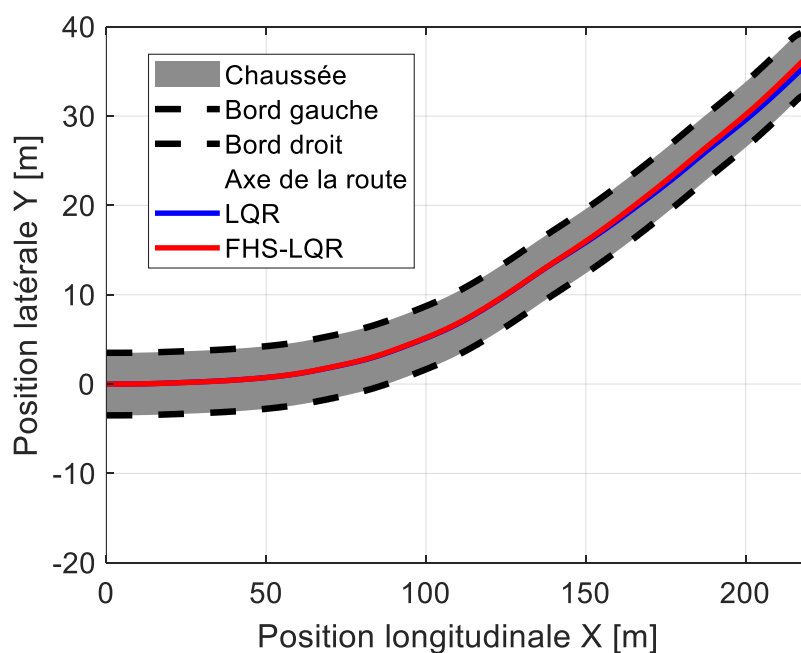


Figure. IV.13 Trajectoire de véhicule

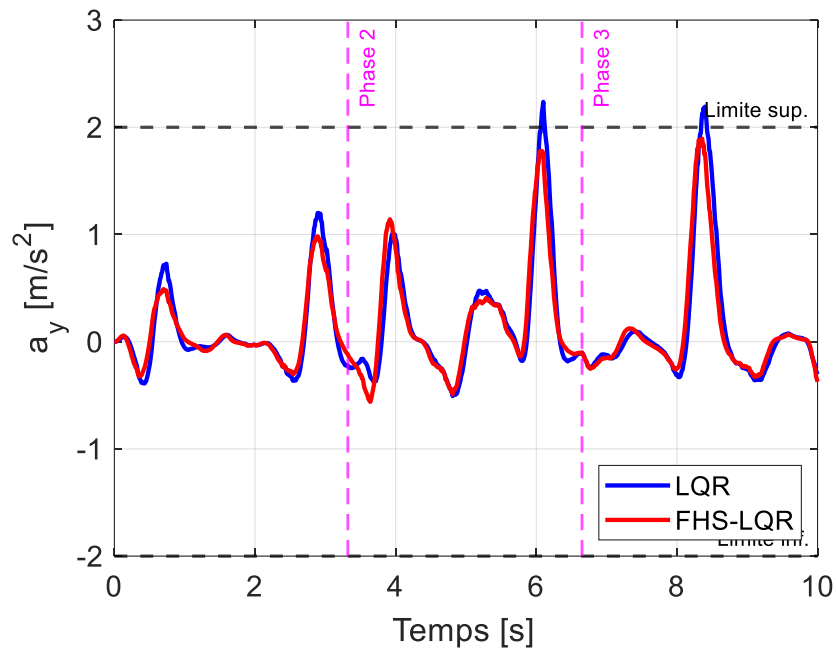


Figure. IV.14 Accélération latéral

La variation de l'autorité du conducteur en trois phases distinctes illustrée dans la Figure IV.4, permettant d'évaluer le comportement du système dans des conditions réalistes de conduite partagée.

Dans la première phase (0–3 s), le conducteur conserve une autorité totale (100%), correspondant à une conduite normale. Dans ce contexte, comme le montrent les Figures IV.5, IV.6 et IV.7, les deux contrôleurs (LQR et FHS-LQR) appliquent un faible couple d'assistance. Cela s'explique par le fait que le conducteur est pleinement actif et capable d'assurer seul le suivi de trajectoire, rendant l'intervention du système volontairement limitée afin de préserver le confort et éviter toute action intrusive.

Dans la deuxième phase (3–6.5 s), l'autorité du conducteur diminue à 50%, simulant une situation de fatigue ou de baisse d'attention. Les Figures IV.5, IV.6 et IV.7 montrent que, dans cette phase, le système d'assistance augmente progressivement son couple afin de compléter l'action du conducteur. Le contrôleur FHS-LQR se distingue particulièrement par une contribution plus importante et mieux adaptée aux variations dynamiques, ce qui traduit sa

capacité à compenser efficacement les insuffisances du conducteur. Cette coopération homme-machine permet d'améliorer la précision du suivi et la stabilité du véhicule.

Dans la troisième phase (6.5–10 s), le conducteur devient totalement inactif (autorité nulle), ce qui correspond à une situation où il lâche le volant. Dans ce cas, le système d'assistance prend entièrement en charge le contrôle du véhicule. Les Figures IV.5, IV.6 et IV.7 montrent clairement que le couple appliqué est alors principalement généré par le contrôleur, en particulier pour le FHS-LQR, qui adopte une stratégie plus énergique afin de garantir le maintien de la trajectoire et la stabilité du véhicule malgré l'absence d'intervention humaine.

La Figure IV.8 illustre l'évolution de l'angle de volant résultant directement des couples de direction appliqués par les contrôleurs LQR et FHS-LQR. L'effet de cette action se reflète directement sur les performances de suivi et la dynamique du véhicule. Les Figures IV.9 et IV.10 montrent que le déplacement latéral et l'erreur de cap sont globalement mieux maîtrisés avec le FHS-LQR. Toutefois, comme le confirme le Tableau IV.2, le contrôleur LQR dépasse les seuils admissibles, avec δ et ψ , en raison de sa sensibilité aux incertitudes et aux perturbations. En revanche, le FHS-LQR réduit significativement ces grandeurs (pour δ et pour ψ) et maintient des niveaux compatibles avec les contraintes de sécurité.

Par ailleurs, les Figures IV.11 et IV.12 montrent que la vitesse de lacet et l'angle de dérive sont également mieux régulés avec le FHS-LQR, avec des améliorations respectives de 9.37 % et 8.39 % en termes de valeurs RMS (Tableau IV.1). Cette meilleure régulation contribue directement à améliorer la stabilité globale du véhicule.

Les Figures IV.13 et IV.14 montrent que les deux contrôleurs assurent le suivi de la trajectoire de référence, avec des trajectoires proches de l'axe de la route. Toutefois, le FHS-LQR présente une précision supérieure, avec une déviation latérale légèrement réduite. En termes de confort, le LQR dépasse la limite de ($\approx$) lors de certaines phases transitoires, ce qui peut engendrer une gêne pour les passagers, alors que le FHS-LQR maintient l'accélération latérale à des niveaux plus modérés, proches du seuil admissible. Cela met en évidence un meilleur compromis entre précision de suivi et confort pour le FHS-LQR.

IV.2.2 Deuxième série

La deuxième série de simulations considère une configuration visant à évaluer l'impact combiné des incertitudes paramétriques et d'un délai de commande de 30 ms sur la stabilité du système et les performances de suivi de trajectoire.

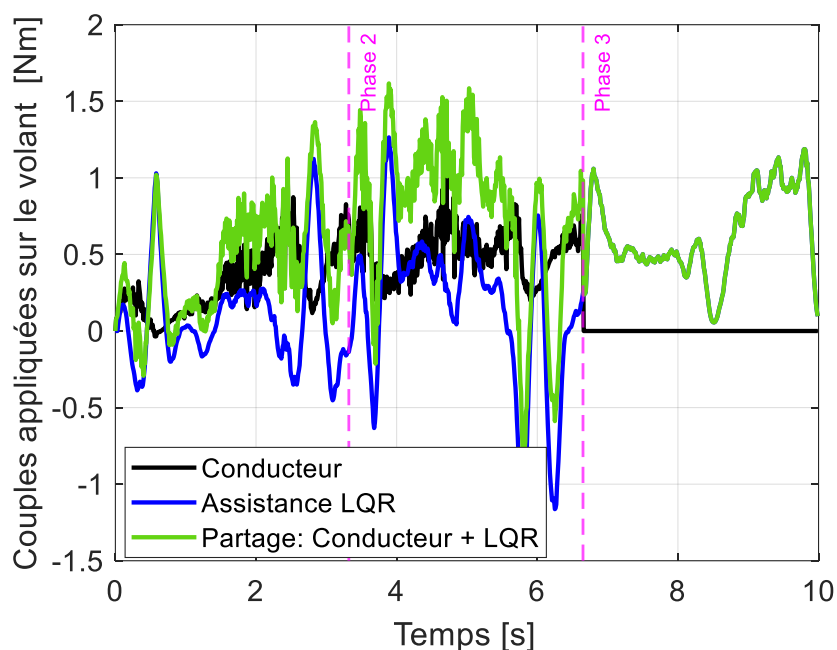


Figure. IV.15 Couples appliquées sur le volant (délai=30 ms)

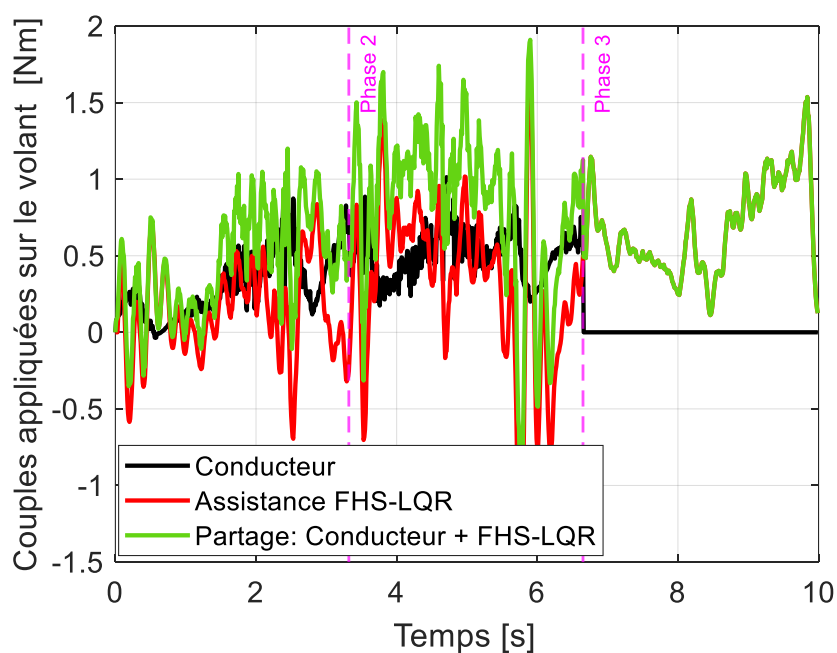


Figure. IV.16 Couples appliquées sur le volant (délai=30 ms)

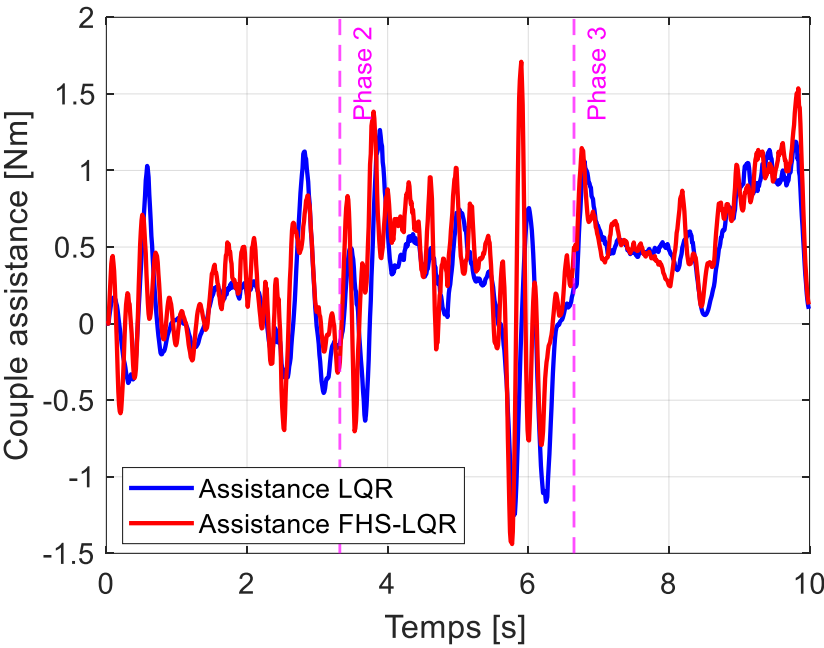


Figure. IV.17 Couples assistances appliquées sur le volant (délai=30 ms)

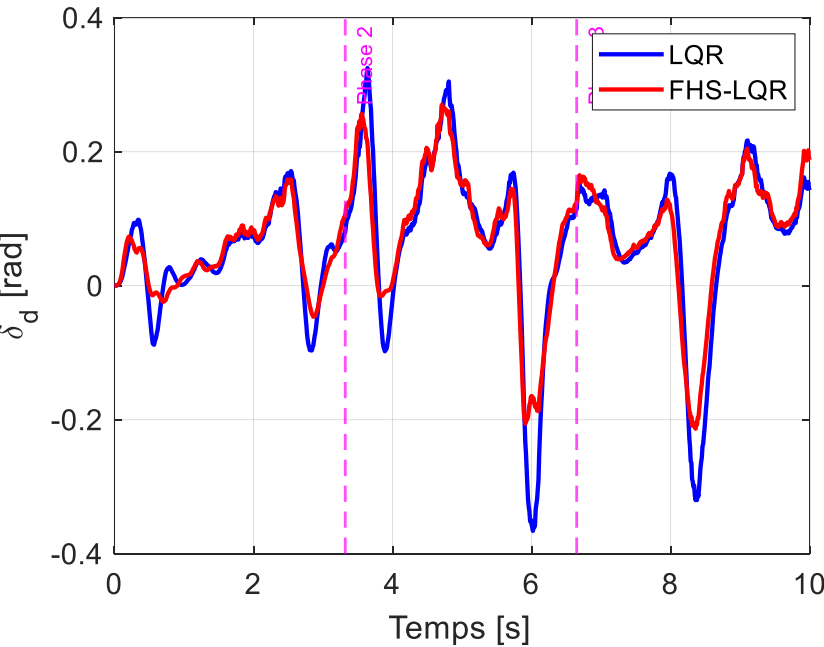


Figure. IV.18 Angle de volant (délai=30 ms)

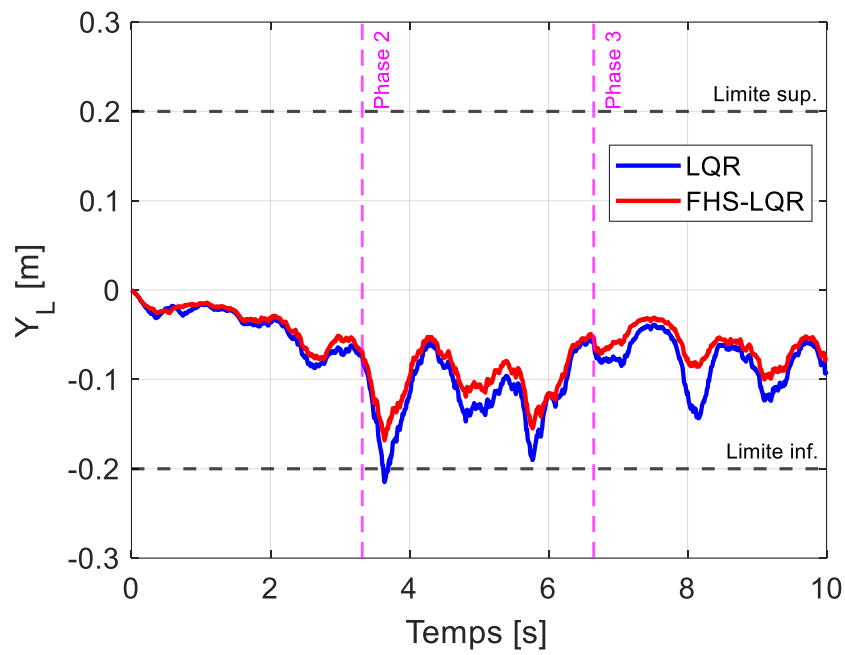


Figure. IV.19 Déplacement latéral (délai=30 ms)

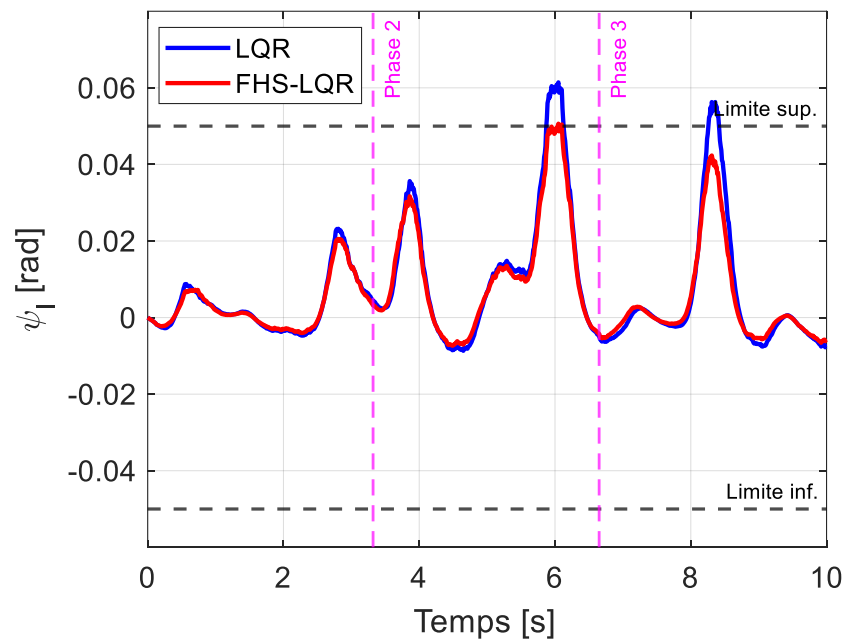


Figure. IV.20 Erreur sur l'angle de cap (délai=30 ms)

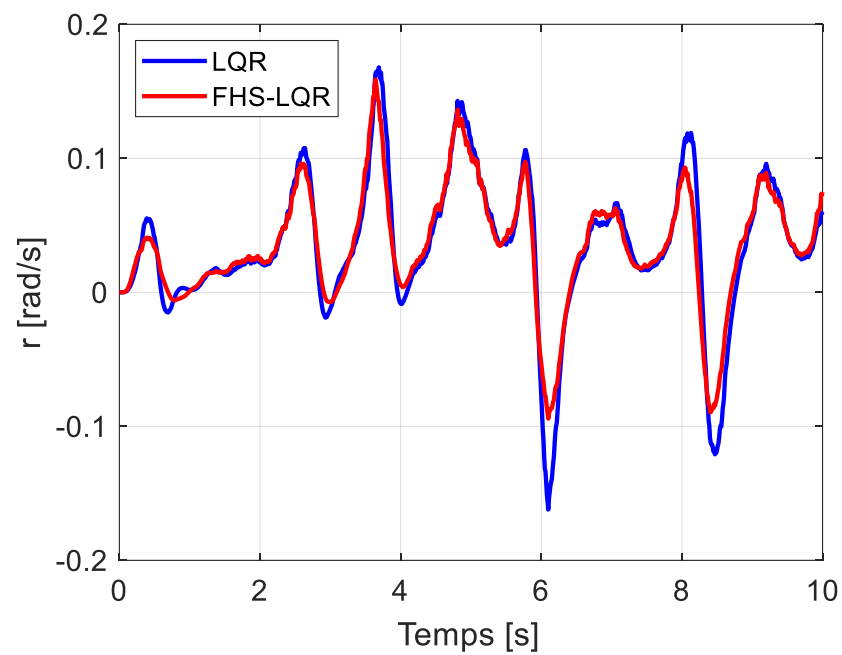


Figure. IV.21. Vitesse de lacet (délai=30 ms)

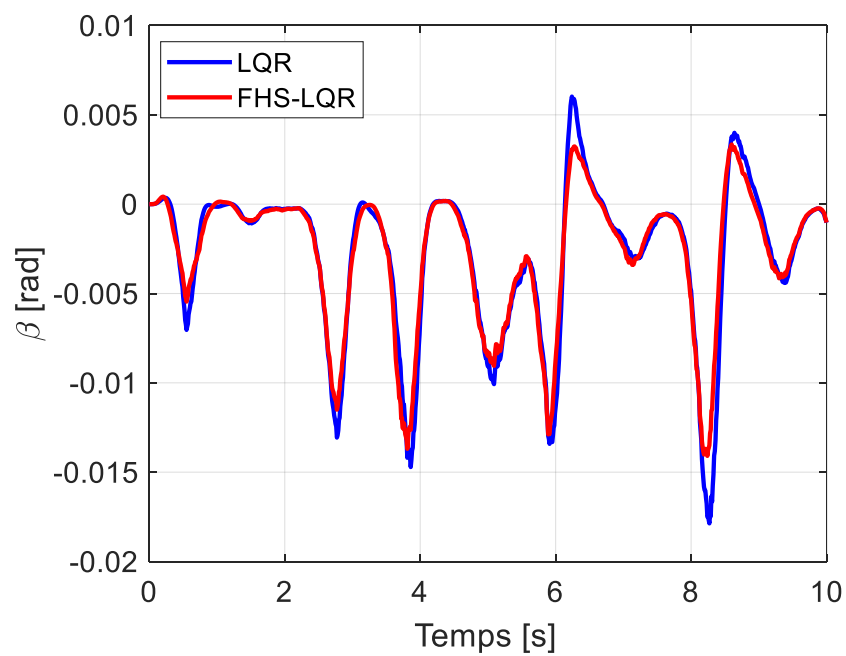


Figure. IV.22 Angle de dérive (délai=30 ms)

Tableau IV.3 Comparaison des performances RMS (délai=30 ms)

Variable	LQR	FHS-LQR	Amélioration (%)
	0.005191	0.004692	9.61
	0.062236	0.055580	10.69
	0.016926	0.014163	16.32
	0.089094	0.073495	17.51
	0.554077	0.469520	15.26

Tableau IV.4 Comparaison des valeurs maximales et coûts de performance (délai=30 ms)

Variable	LQR	FHS-LQR	Réduction (%)
Erreur latérale maximale	0.214883	0.168242	21.71
Erreur de cap maximale	0.061434	0.050636	17.58
Accélération latérale maximale	2.542115	1.862670	26.73

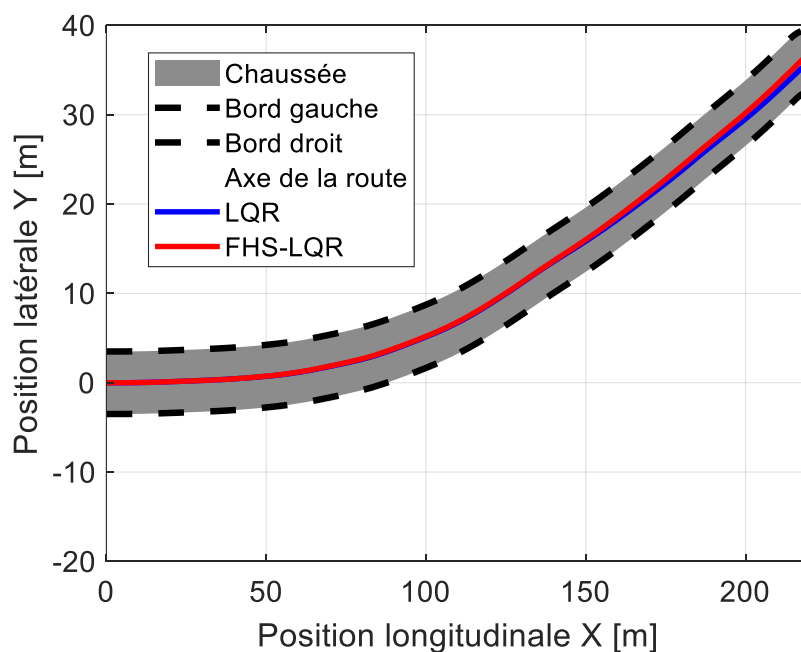


Figure. IV.23 Trajectoire de véhicule

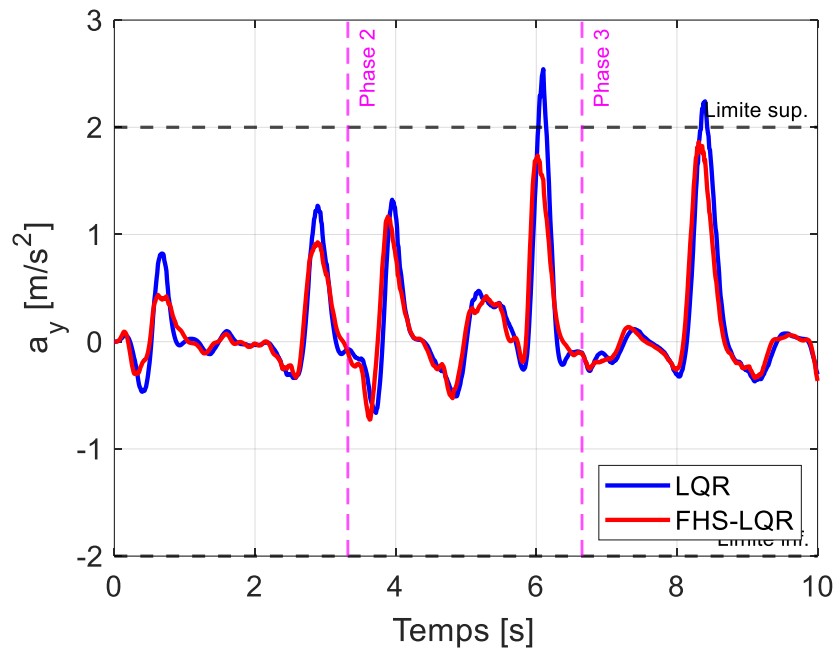


Figure. IV.24 Accélération latéral (délai=30 ms)

Dans cette seconde configuration, un délai de commande est introduit, tandis que l'action du conducteur est considérée instantanée, ce qui permet de limiter et d'isoler partiellement l'impact du délai sur le système d'assistance. Les Figures IV.15 à IV.17 montrent que, malgré ce délai, le contrôleur FHS-LQR maintient une contribution d'assistance plus adaptée que le LQR, avec une capacité accrue à compenser les perturbations. Le LQR, en revanche, présente des variations plus marquées du couple, traduisant une sensibilité plus élevée au délai.

Cette différence se répercute sur l'angle de volant (Figure IV.18), où le FHS-LQR conserve un signal plus régulier, tandis que le LQR devient plus oscillatoire. Cette meilleure modulation de l'action de commande permet au FHS-LQR de limiter les effets du retard et de préserver la stabilité du système.

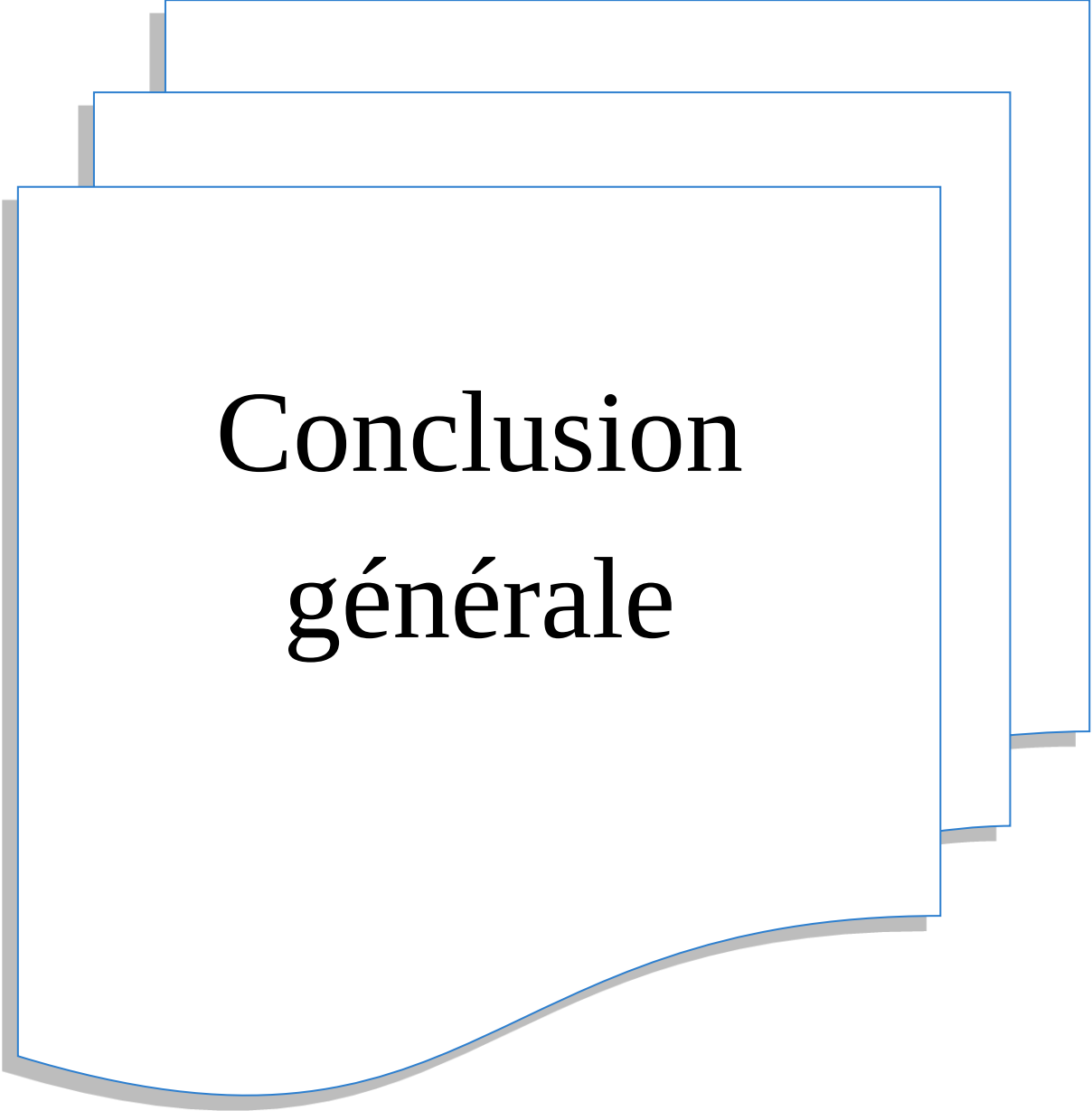
Les performances de suivi (Figures IV.19 et IV.20) confirment cette tendance : le FHS-LQR assure un meilleur respect des contraintes sur le déplacement latéral et l'erreur de cap, alors que le LQR présente des dépassements plus prononcés. Cette observation est cohérente avec le Tableau IV.2, qui montre une réduction significative des valeurs maximales avec le FHS-LQR, notamment pour (−21.71 %) et (−17.58 %).

Par ailleurs, les variables dynamiques (Figures IV.21 et IV.22) restent mieux maîtrisées avec le FHS-LQR, ce qui contribue à maintenir la stabilité malgré la présence du délai. Le Tableau IV.3 confirme également une amélioration globale en termes de performances RMS, notamment pour (+10.69 %) et (+9.61 %).

Enfin, la trajectoire du véhicule (Figure IV.23) montre que les deux contrôleurs assurent le suivi de la route, mais avec une précision légèrement supérieure pour le FHS-LQR. En termes de confort (Figure IV.24), le LQR dépasse à nouveau la limite de , contrairement au FHS-LQR qui maintient l'accélération latérale à des niveaux plus modérés.

IV.3 Conclusion

Ce chapitre a évalué par simulation les stratégies LQR et FHS-LQR sur le modèle véhicule–route en présence d'incertitudes et d'un délai de 30 ms. Les résultats montrent que le LQR est sensible au délai et aux incertitudes, pouvant entraîner des dépassements des contraintes, tandis que le FHS-LQR améliore le suivi de trajectoire, la stabilité et respecte globalement les limites de sécurité et de confort. Le contrôle partagé confirme également la capacité du FHS-LQR à adapter efficacement son action selon l'implication du conducteur.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux réalisés dans ce mémoire se sont inscrits dans le cadre de l'application des méthodes de l'automatique aux problématiques actuelles du contrôle des véhicules, en particulier pour les systèmes d'assistance au maintien de voie.

Après avoir défini les objectifs de l'étude, un état de l'art des systèmes intelligents de transport et des techniques de commande latérale a permis de situer les enjeux scientifiques et technologiques liés à la sécurité et au confort de conduite. Un modèle dynamique du véhicule, basé sur une représentation simplifiée à trois degrés de liberté, a ensuite été établi afin de décrire les principaux comportements latéraux, en intégrant le système de vision et la dynamique de la direction. Ce modèle a été volontairement linéarisé afin de permettre la synthèse de lois de commande adaptées.

Dans ce contexte, une stratégie d'assistance préventive à la sortie de voie a été proposée, agissant en fonction de l'état du conducteur et des conditions de conduite. L'assistance intervient via un moteur électrique appliquant un couple sur la colonne de direction, permettant de corriger la trajectoire tout en tenant compte de l'action du conducteur. Deux approches de commande, LQR et FHS-LQR, ont été étudiées et comparées dans un cadre de contrôle partagé.

Les résultats de simulation, réalisés en présence d'incertitudes paramétriques et d'un délai de commande, montrent clairement les limites du contrôleur LQR, notamment en termes de sensibilité aux perturbations et de dépassement des contraintes de sécurité. À l'inverse, la stratégie FHS-LQR démontre une meilleure robustesse, avec une réduction significative des erreurs de suivi, une meilleure régulation des variables dynamiques et un respect global des limites imposées, en particulier pour le déplacement latéral, l'erreur de cap et l'accélération latérale.

Par ailleurs, l'intégration du contrôle partagé, à travers différentes phases d'implication du conducteur, a permis de mettre en évidence la capacité du FHS-LQR à adapter son effort de commande en fonction du niveau d'intervention humaine. Cette approche assure une transition progressive entre les modes manuel, assisté et autonome, tout en garantissant un compromis optimal entre précision, stabilité et confort.

En perspective, ce travail ouvre la voie à l'intégration de méthodes plus avancées, notamment l'optimisation multi-objectifs et l'apprentissage automatique, afin d'améliorer davantage les performances et l'adaptabilité des systèmes d'assistance à la conduite dans des environnements encore plus complexes et incertains.

.

Bibliographie

- [Cha-93] C.C. Chan, *An overview of electric vehicle technology*, Proceedings of the IEEE, Vol. 81, Issue 9, pp. 1202 – 1213, Sept. 1993.
- [Col-08] Cole, D. J., *Neuromuscular dynamics and steering feel*, Proceedings of Steering Tech, , Munich, Germany, 2008.
- [Ena-08], Enache, N. M., *Assistance préventive à la sortie de voie*, thèse, LIVIC-LCPC, 2008.
- [Fen-76] R. Fenton, G. Melocik et K. Olson, *On the steering of automated vehicles: Theory and experiment*. IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 21, pp. 306-315, 1976.
- [Fra-92]. T. Fraichard, M. Hassoun et N. Lefort, *An electronic co-pilot: The Pro-Lab II demonstrator*. Proceeding of the 3rd PROMETHEUS Collision Avoidance Workshop, pp. 230-237, 1992.
- [Gar-60] K. Gardels, *Automatic car controls for electronic highways*. General Motors Research Laboratory Warren, Michigan, Tech. Rep. GMR-276, Jun. 1960.
- [Gen-97] G. Genta, *Motor vehicle dynamics: modeling and simulation*, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Vol. 43, 1997
- [Har-07c] K. Hartani, M. Bourahla, Y. Miloud, T. Terras, M. Chikouche, M. Sekkour, *Commande directe de couple d'un groupe motopropulseur synchrone à aimants permanents : Application véhicule électrique*, MOAD'07, Bejaïa, Novembre 18-19-20, 2007.
- [Kop-03] Koppa, R.J., Human Factors' Chapter 3 of: N.H.Gartner, C.J. Messer, A.K. Rath, (Eds), *Traffic Flow Theory Transportation Research Board Monograph*, National Research Council, Washington DC 2000, 2003.
- [Kop-94] M.Kopf Ein Beitrag zur modellbasierten, *adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf der deutschen Autobahnen*. Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik, No. 203, VDI-Verlag, 1994.
- [Mam-05] S. Mammar, P. Martinet, S. Glaser, M. Netto, L. Nouvelière et B. Thuilot, *Méthodes de l'automatique pour l'assistance et l'automatisation de la conduite automobile*. Actes de la 5e Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Guidel, Morbihan, 5-7 octobre, pp. 263-272, 2005.
- [Mam-06] S. Mammar, S. Glaser et M. Netto, *Time to line crossing for lane departure avoidance: A theoretical study and an experimental setting* IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, pp. 226-241, 2006.

-
- [Mer-15] Abdelkader Merah, Kada Hartani, Azeddine Draou, *A new shared control for lane keeping and road departure prevention*, Vehicle System Dynamics, DOI: 10.1080/00423114.2015.1115882, 201
- [Mer-26] Merah, A., Hartani, K., Aouadj, N., *Finite Horizon Stochastic LQR with NSGA-II for EV suspension*, Proc. IMechE Part D, 2026
- [Mul-01] B. Multon, *Motorisation des Véhicules Électriques*, Techniques de l'Ingénieur, Article E3996, Volume E5, Paris, Février 2001.
- [Nag-02] Nagai, M., H. Mouri, P. Raksincharoensak, *Vehicle lane-tracking control with steering torque input*, Vehicle System Dynamics supplement 37 . pp. 267-278, 2002
- [Pac-79] H.B Pacejka., *Tires factors and vehicle handling*. Int. J Vehicle Design, 1 :1–23, 1979.
- [Pace-02] H.B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, SAE International, 2002.
- [Rah-04] Raharijaona, T., *Commande robuste pour l'assistance au contrôle latéral d'un véhicule automobile*, thèse, Supélec, 2004.
- [Raj-06] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer Verlag, 2006.
- [Sek-13b] M'hamed. Sekour, *Contribution à la commande robuste d'un système de traction multimachine – Application au véhicule électrique*, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2013.
- [Sen-07] Sentouh, C., *Analyse du risque et détection de situations limites, Application au développement des systèmes d'alerte au conducteur*, thèse, Université d'Evry Val d'Essonne, IBISC, 2007.
- [Sen-09] Sentouh, C., Ph. Chevrel, F. Mars, F. Claveau, *A human-centred Approach of Steering Control Modelling*, Proceedings of the 21st IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 2009.
- [Tof-07] Toffin, D., G. Reymond, A. Kemeny, J. Droulez, *Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis*, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 4, 375–388, April 2007.
- [Oli-94] Oliver M P., *Équipement pour l'eau et l'environnement : Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation* Thèse de Doctorat, École nationale du génie Rural des eaux et des Forêts .janvier 1994.
- [Ous-95] Oustaloup A., *la dérivation non entiere : Théorie, Synthèse et Application*'. Edition Hermes, Paris. 1995
- [Lar-10] Laroche E., Note de cours de master Autumatique et robotique : *Commande Optimale*'. Ecole nationale superieure de physique de Strabourd. 2010.
- [Lar-96] Larmiat.P., *Automatique : Commande des systèmes linéaire*. 2ème édition. Edition Hermès, paris. 1996.

Paramètres du véhicule

Masse du véhicule :	1562 Kg
Moment d'inertie du véhicule :	2630 Kg.m ²
Longueur entre le train avant et le centre de gravité :	1.104 m
Longueur entre le train arrière et le centre de gravité :	1.421 m
Longueur entre les deux trains avant et arrière :	1.525 m
Hauteur du centre de gravité :	0.5 m
Moitié de la longueur du train arrière :	0.75 m
Section frontale véhicule :	2.04 m ²
Densité volumique de l'air :	1.2 Kg.m ⁻³
Coefficient de pénétration dans l'air :	0.25
Coefficient de résistance au roulement :	0.01
Rigidités au glissement latéral des pneus avant :	37407 N/rad
Rigidités au glissement latéral des pneus arrière :	51918 N/rad
Moment d'inertie de la roue :	1.284 Kg.m ²
Rayon de la roue :	0.294m
Longueur entre le centre de la roue et le point où sa charge agit :	0.0037 m