

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

*_*_*_*_*_*_*_*_*_*



Université de Monastir

*_*_*_*_*_*_*_*_*_*

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir

*_*_*_*_*_*_*_*_*_*



Année Universitaire:2016/2017

MEMOIRE

DE

PROJET DE FIN D'ETUDES

PRESENTE POUR OBTENIR LE

DIPLÔME NATIONAL D'INGENIEUR

Spécialité : GENIE ELECTRIQUE

Par

Sirine KOUADA

Née le: 20/08/1993 à Sousse

Commande dynamique de véhicules dans des configurations complexes

Soutenu le 14/09/2017 ; devant le jury d'examen:

M. Nouredine LIOUANE (Professeur à l'ENIM)	: Président
M. Anouar BENAMOR (Maitre assistant à FSM)	: Membre
M. Hassani MESSAOUD (Professeur à l'ENIM)	: Encadrant
M.Lounis ADOUANE (Maître de Conférences à PCF)	: Encadrant

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport ont été réalisés dans le laboratoire « Institut Pascal » placé sous la tutelle de l'Université Clermont Auvergne, du CNRS (institut principal INSIS, instituts secondaires INS2I, INP) et de SIGMA Clermont. Mon travail était élaboré sous l'axe ISPR (Image, Systèmes de Perception, Robotique) et je faisais partie de l'équipe MACCS spécialisé dans la modélisation, l'identification et la commande.

Je tiens donc à remercier les personnes suivantes :

Monsieur Hassani MESSAOUD, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir (ENIM) et directeur du Laboratoire de recherche en Automatique Traitement de Signal et Image (LARATSI, Code : LR13ES 13) à l'ENIM. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son soutien et ses conseils avisés.

Monsieur Lounis ADOUANE, Maître de Conférences-HDR à Polytech'Clermont-Ferrand et chercheur à l'Institut Pascal (Equipe MACCS) pour l'accueil qu'il m'a réservé pendant les 5 mois de PFE, pour son encadrement, son aide et sa disponibilité tout au long de mon travail.

Monsieur Charles PHILIPPE, thésard à l'Institut Pascal, pour ses remarques qui ont contribué à l'amélioration de mon projet

Je souhaite également vivement remercier l'ensemble des chercheurs, doctorants et administratifs de l'Institut Pascal, pour m'avoir permis de réaliser mes objectifs.

Sommaire

Remerciements.....	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Cadre du projet.....	3
I. Introduction.....	3
II. Organisme d'accueil.....	3
II.1. Présentation générale	3
II.2. Plateformes et équipements	4
II.3. Axes de recherche	5
III. Processus étudié	7
III.1. Rappels sur l'histoire de la robotique mobile et les systèmes dynamiques hybrides	7
III.1.1. Historique de la robotique mobile.....	7
III.1.2. La navigation autonome des robots mobiles.....	7
III.1.3. Structure d'un système dynamique hybride (SDH).....	9
III.2. Modélisation du véhicule.....	10
III.2.1. Description du véhicule	10
III.2.2. Modélisation du châssis ou caisse.....	11
III.2.3. Modélisation de l'actionneur	13
IV. Conclusion	15
Chapitre 2 : Etat de l'art de la commande H_{∞}.....	16
I. Introduction.....	16
II. Rappel sur la commande robuste.....	16
II.1. Le rôle du bouclage dans la commande	17
II.2. La théorie de la commande robuste	17
II.2.1. Insuffisance de la commande classique.....	17
II.2.2. Emergence de la commande robuste	18
II.3. Quelques types de commande robuste	18
II.3.1. Commande floue	19
II.3.2. Commande par mode glissant	19
II.3.3. Commande synergétique	19

III. La commande longitudinale et latérale	20
III.1. La commande longitudinale	20
III.2. La commande latérale.....	21
IV. La commande latérale de type H_∞	21
IV.1. Synthèse du contrôleur H_∞	21
IV.1.1. Forme standard	22
IV.1.2. Norme d'une matrice de transfert	23
IV.1.3. Le problème H_∞ standard.....	24
IV.2. Résolution du problème H_∞	24
IV.2.1. Représentation d'état du système	24
IV.2.2. Hypothèses.....	24
IV.2.3 Résolution par l'algorithme de Glover-Doyle	25
V. Intérêts de la commande H_∞	27
VI. Les incertitudes du système	27
VI.1. Les sources d'incertitudes	27
VI.2. Les différentes classes d'incertitudes	28
VII. Cahier des charges	30
VIII. Conclusion.....	30
Chapitre 3 : Architecture de commande proposée	31
I. Introduction.....	31
II. Problématique et travail demandé	31
III. Architecture proposée.....	36
III.1. Principe	36
III.2. Fonction d'interpolation	36
III.3. Simulations et interprétations	37
III.3.1. 1 ^{ère} manœuvre : Echelon	38
III.3.2. 2 ^{ème} manœuvre : Rampe + Echelon	40
IV. Conclusion	43
Conclusion générale et perspectives.....	44
Annexe A.....	45
Bibliographie.....	46

Liste des figures

Figure 1. L'institut Pascal	3
Figure 2. Robot manipulateur.....	6
Figure 3. Véhicule autonome	10
Figure 4. Les axes du véhicule	11
Figure 5. Châssis d'un véhicule	11
Figure 6. Modèle dynamique du véhicule	12
Figure 7. Train avant	14
Figure 8. Suspension	14
Figure 9. Pneumatique du véhicule	15
Figure 10. Bouclage du système et de la loi de commande	17
Figure 11. Le modèle généralisé	22
Figure 12. La forme standard	23
Figure 13. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=3\text{m/s}$).....	33
Figure 14. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 9\text{m/s}$).....	33
Figure 15. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=12\text{m/s}$).....	34
Figure 16. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=4 \text{ m/s}$).....	34
Figure 17. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=11 \text{ m/s}$).....	35
Figure 18. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =5\text{m/s}$).....	39
Figure 19. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =10\text{m/s}$).....	39
Figure 20. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =12\text{m/s}$).....	39
Figure 21. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 4\text{m/s}$).....	41
Figure 22. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =7\text{m/s}$).....	41
Figure 23. Zoom de la vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =7\text{m/s}$).....	41
Figure 24. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =12\text{m/s}$).....	42
Figure 25. Zoom de la vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} =12\text{m/s}$).....	42

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du système à $V=3\text{m/s}$ (Echelon)	33
Tableau 2. Caractéristiques du système à $V=9\text{m/s}$ (Echelon)	33
Tableau 3. Caractéristiques du système à $V=12\text{m/s}$ (Echelon)	34
Tableau 4. Caractéristiques du système à $V=4\text{m/s}$ (Rampe + Echelon)	35
Tableau 5. Caractéristiques du système à $V=11\text{m/s}$ (Rampe + Echelon)	35
Tableau 6. Caractéristiques du système (Echelon).....	38
Tableau 7. Caractéristiques du système (Rampe + Echelon)	40

Introduction générale

Ce rapport se situe dans le cadre d'un projet de fin d'études mené au sein du laboratoire « Institut Pascal » à Clermont- Ferrand sur la commande dynamique de véhicules dans des configurations complexes.

Il participe à la mise en œuvre d'une architecture de commande dédié au contrôle latéral du véhicule. Il établit également une continuité des travaux effectués lors des travaux précédents qui ne considéraient que le modèle cinématique du véhicule et aucune incertitude des paramètres n'a été prise en compte.

En effet, le véhicule est un système complexe sujet de nombreuses incertitudes sur la masse, le centre de gravité et le moment d'inertie par exemple et soumis à de multiples perturbations telles que des vents latéraux ou le dévers de la route. La conception d'une architecture de contrôle latéral apparaît donc comme un problème de robustesse face aux incertitudes et aux perturbations.

Face au développement technologique rapide et vu les besoins de plus en plus de précision et de robustesse, les systèmes automatisés n'ont cessé d'évoluer entraînant inévitablement des structures de commandes de plus en plus complexes. Les commandes dites classiques ont été souvent mise à des difficultés devant des contraintes multiples et des besoins accrus en performance.

Lorsque la partie commandée du processus est faiblement perturbée, les commandes classiques, par exemple à action proportionnelle intégrale dérivée, peuvent s'avérer suffisantes si les exigences en précision et en performance du système ne sont pas trop sévères. Toutefois ces contrôleurs ne sont pas aptes à assurer le fonctionnement souhaité lors de l'apparition des diverses perturbations et si le cahier de charge est très exigeant. On observe alors une dégradation des performances des procédés, risquant même de provoquer leur instabilité. Or la commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations externes. Il est donc nécessaire de recourir à des techniques de commandes avancées, capables de prendre en considération les perturbations, et permettre d'avoir un bon comportement des procédés. Parmi les solutions existantes, l'utilisation de commandes dites « Robustes » est une solution envisagée.

De nombreuses approches robustes ont été proposées, on peut citer dans ce contexte, la commande H_∞ , la commande par mode glissant, la commande floue, la commande synergétique.... On s'intéressera à la technique de synthèse basée sur la norme H_∞ . Ces méthodes de type H_∞ se révèlent maintenant de plus en plus utilisées dans la résolution de problèmes de commande robuste et les résultats théoriques liés à ces approches sont connus. Ces stratégies de commande font l'objet depuis plusieurs années d'une intense activité de recherche. Cette technique consiste à trouver un contrôleur capable d'assurer la stabilité et de satisfaire des performances, sous la condition de minimiser la norme H_∞ du transfert en boucle fermée. En effet, les commandes de ce type permettent de garantir la robustesse des lois de commande et de prendre en compte des attributs de performance. Leurs propriétés en font des outils a priori bien adaptés à la synthèse d'un contrôleur H_∞ dédié à la commande latérale, et c'est pourquoi nous les avons retenues.

L'objectif de ce travail consiste alors à déterminer des commandes robustes, performantes et relativement simples à mettre en œuvre qui garantissent la stabilité du procédé.

Organisation du rapport

Le rapport sera organisé alors comme suit :

- Le premier chapitre est dédié au cadre du projet. On commencera par une présentation de l'organisme d'accueil puis on donnera une présentation du processus étudié : on commencera par des généralités sur l'historique de la robotique mobile et les systèmes dynamiques hybrides puis on se concentrera sur la modélisation du véhicule.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art de la commande H_∞ . On présentera d'abord la théorie de la commande robuste et son intérêt par rapport à la commande classique puis on se focalisera à l'étude de la commande robuste de type H_∞ utilisée pour la commande latérale du véhicule
- Le troisième et le dernier chapitre contient l'architecture de contrôle proposée. On présentera d'abord la problématique du projet puis une solution est proposée et validée par des simulations et des interprétations.

Chapitre 1

Cadre du projet

I. Introduction

Ce chapitre s'articule autour de deux parties essentielles : la première donne une description générale de l'organisme d'accueil et la deuxième donne une présentation détaillée du processus étudié.

II. Organisme d'accueil

On présentera dans la suite le laboratoire dans lequel j'ai élaboré mon stage : « L'institut Pascal ».

II.1. Présentation générale

L'**Institut Pascal** est un laboratoire de recherche interdisciplinaire qui s'inscrit dans des domaines stratégiques des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes : Génie des Procédés, Mécanique, Robotique, Physique des Sciences de l'Information, Santé. Il est placé sous la tutelle de l'Université Clermont Auvergne, du CNRS (institut principal INSIS, instituts secondaires INS2I, INP) et de SIGMA Clermont.



Figure 1. L'institut Pascal

L'Institut Pascal résulte du regroupement en 2012 de trois unités : le Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Électronique et Automatique (LASMEA), le Laboratoire de Mécanique et Ingénieries (LaMI) et le Laboratoire de Génie Chimique et Biochimique (LGCB).

Les forces vives de l'Institut Pascal sont localisées sur le site clermontois (Campus des Cézeaux: direction/EUPI, Polytech, SIGMA. CHU : G. Montpied et Estaing), le site de Montluçon (IUT d'Allier) et le site du Puy en Velay (IUT de Clermont).

L'institut Pascal contient 132 enseignants-chercheurs (UCA, SIGMA), 4 chercheurs (CNRS), 27 post-doctorants, 151 doctorants et CDD et 2 autres personnels contractuels. Il a produit 2400 articles et 32 brevets à partir de l'année 1983 jusqu'à 2017. Il réalise des 19 contrats européens et 60 contrats industriels.

L'institut Pascal collabore avec 50 laboratoires, centres et instituts de recherche en France et plus de 50 Universités et organismes de recherche internationaux partenaire médecine régional: CHU de Clermont-Ferrand.

L'Institut Pascal est membre de FACTOLAB, laboratoire commun avec la manufacture MICHELIN.

Il est membre des pôles de compétitivité Céréales Vallée et ViaMéca et ses partenaires sont : MICHELIN, RENAULT, PSA, AUBERT & DUVAL, LIGIER, CONSTELIUM, LIMAGRAIN, SNCF, EDF, SAFRAN, BABYMOOV, ANSALDO, ALEDIA, QUANTEL MEDICAL, SUPERSONIC IMAGINE, THALES, TERUMO EUROPE...

II.2. Plateformes et équipements

Au sein de l'institut Pascal, les travaux sont menés en utilisant :

➤ ***7 plateformes expérimentales :***

- PAVIN (Plateforme Auvergnate Pour les Véhicules Intelligents)
- EquipEx CNRS ROBOTEX (Plateforme Robotique Manipulatrice, Robotique de Production)
- PACEM (Plateforme d'essais en Compatibilité Electromagnétique)
- Plateforme de Spectroscopies Electroniques (UCA Start)
- Plateforme de Spectroscopies Optiques

- Plateforme de croissance
- Le Pensio (Plateforme Numérique, Cave, Impression 3D, Réalité Virtuelle)
- **7 plateformes expérimentales des partenaires**
 - Bio-Up (Plateforme pour le Développement des Bioprocédés - Polytech)
 - Gen'Mat Matériaux (Caractérisation physique et physicochimique des matériaux – Polytech)
 - ECOGRAFI (Plateforme pour l'ECOvalorisation des matériaux GRANulaires et FIlbreux - Polytech)
 - MSGC (Plateforme Matériaux et Structures pour le Génie Civil - Polytech)
 - Méc@prod (Plateforme de transfert technologique pour la mécanique de production - SIGMA Clermont)
 - IRM 3T Recherche (Plateforme IVIA - CHU Clermont)
 - Plateau de cœlioscopie et de cathétérisme expérimental (UFR Médecine)

II.3. Axes de recherche

L'Institut Pascal est composé de 5 Axes de recherche :

- Génie des Procédés, Energétique et Biosystèmes (GePEB)
- Image, Systèmes de Perception, Robotique (ISPR)
- Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel (M3G)
- Photonique, Ondes, Nanomatériaux (PHOTON)
- Thérapies Guidées par l'Image (TGI)

Dans la suite je détaille l'axe au sein duquel j'ai préparé mon Projet de Fin d'Etudes et qui est l'axe ISPR.

Sous cet axe on trouve 4 équipes chacun s'occupe d'un domaine déterminé :

- ✓ **Vision artificielle (ComSee)**
- ✓ **Modélisation, Identification et Commande (MACCS)**
- ✓ **Systèmes de perception multi sensorielle (PerSyst)**
- ✓ **Architecture matérielle et logicielle pour la perception (DREAM)**

Lors de mon stage j'étais membre de l'équipe MACCS

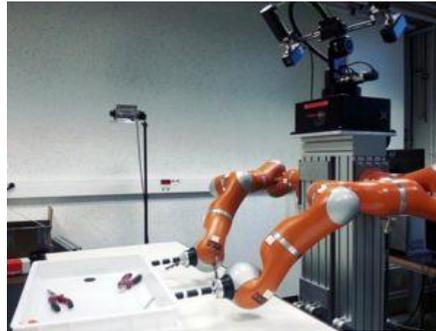


Figure 2. Robot manipulateur

Il s'agit d'une équipe de l'institut Pascal où les recherches portent principalement sur la modélisation et le contrôle de robots mobiles et manipulateurs (figure 3), la vision des robots, la vision active, la maîtrise visuelle et les comportements d'anticipation. Les applications de ces recherches sont liées à la fabrication robotisée et aux systèmes de transport intelligents.

Les recherches de cette équipe concernent :

- **Les véhicules Autonomes (AV)**
 - Robot et contrôle multi-robots (Non Lineaire, Adaptif, Prédicatif, Robuste)
 - Mobilité renforcée (Sliding et Slipping) et dynamiques incertaines
 - Architecture de contrôle hybride et surveillance
 - Evitement d'obstacle
 - Robots (Mobile, Véhicules tout terrain, Véhicules agricoles, Platoon, Robot Multi - Système)

- **La Modélisation, l'Apprentissage et la Perception pour la Commande (MLPC)**
 - Commande d'apprentissage pour robot
 - Perception active
 - Maîtrise visuelle
 - Contrôle multi -bras et redondance

Mon travail s'intéresse à la commande des véhicules autonomes

III. Processus étudié

III.1. Rappels sur l'histoire de la robotique mobile et les systèmes dynamiques hybrides

Le processus étudié est un robot mobile. A ce propos, on commence par un survol sur la robotique mobile et les systèmes dynamiques hybrides.

III.1.1. Historique de la robotique mobile

Selon l'Association Japonaise de Robots Industriels (AJRI), les robots sont répartis dans les classes suivantes :

- Classe 1 : robot de manipulation manuelle : un robot à plusieurs degrés de liberté actionné par l'opérateur.
- Classe 2 : robot à séquence fixe : robot de manipulation qui effectue les étapes successives d'une tâche en fonction d'une méthode prédéterminée, qui est difficile à modifier.
- Classe 3 : robot à séquence variable : le même type de robot de manipulation que dans la classe 2, mais les étapes peuvent être modifiées facilement.
- Classe 4 : robot playback : l'opérateur humain effectue la tâche manuellement en conduisant ou en commandant le robot, qui enregistre les trajectoires. Cette information est rappelée lorsque cela est nécessaire, et le robot peut effectuer la tâche en mode automatique.
- Classe 5 : robot à commande numérique : l'opérateur humain alimente le robot avec un programme de mouvement plutôt que de lui enseigner la tâche manuellement.
- Classe 6 : robot intelligent : un robot avec des moyens de comprendre son environnement, et la capacité de mener à bien une tâche malgré les changements dans les conditions ambiantes dans lesquelles celui-ci doit exécuter sa tâche.

La Robotics Institute of America (RIA) ne considère que les machines qui sont au moins de la classe 3 comme étant des robots : “ Un robot est un manipulateur reprogrammable, polyvalent conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés, par le biais de mouvements variables programmés pour l'exécution de diverses tâches.”

III.1.2. La navigation autonome des robots mobiles

L'autonomie est la capacité de résister à des perturbations externes en utilisant les ressources internes. L'autonomie d'un robot est une faculté relative et non absolue, elle est liée aux capacités du robot, aux caractéristiques de l'environnement dans lequel il est plongé, à leurs

variations, et enfin aux tâches qu'il doit effectuer. La tâche d'autonomie est complexe lorsqu'on considère l'interaction du robot avec son environnement

La navigation autonome des robots mobiles est une thématique de recherche qui présente un large spectre de problématiques comme le fait de donner à un robot la capacité de se déplacer de manière sûre et précise sur différents types de terrains, encombrés, glissants...

Cette complexité conduit généralement à structurer les systèmes de navigation en plusieurs sous-tâches, tout en gardant l'objectif de naviguer en sécurité. En effet, une conduite autonome requiert trois étapes clés : la perception de l'environnement et la localisation, la planification des trajectoires et la commande du véhicule :

- La perception de l'environnement consiste à détecter la chaussée, les voies, les obstacles fixes et mobiles et la localisation permet au véhicule de se repérer dans un repère global, ce qui permettrait de définir les itinéraires possibles de navigation pour atteindre l'objectif fixé.
- La génération de trajectoire consiste à calculer une trajectoire de référence, qui évite les obstacles et respecte plusieurs autres critères : comme le confort, la sécurité des passagers et le code de la route.
- La commande du véhicule consiste à manœuvrer le véhicule en utilisant les actionneurs pour suivre la trajectoire de référence. Cette étape peut être subdivisée en deux tâches : la commande longitudinale et la commande latérale.

Toutes ces étapes sont assurées par l'interaction de plusieurs modules :

- ✓ Le module de PLANIFICATION : explore l'espace des configurations possibles du robot, et génère un itinéraire admissible, sans collisions, et jugé optimal pour répondre aux critères de la mission demandée [1].
- ✓ Le module PERCEPTION : permet la localisation probable du robot dans son environnement et l'estimation de son état interne et de son environnement local (état du sol, obstacles statiques et dynamiques [2])
- ✓ Le module de DECISION : analyse la situation et décide des actions appropriées (évitement d'obstacles [3], suivi d'une trajectoire sélectionnée avec un certain profil de vitesse [4]).

- ✓ Le module ACTION (c'est au niveau de ce module que s'inscrit plus particulièrement ce travail de PFE) génère ensuite les commandes à envoyer aux actionneurs du robot pour s'asservir sur les consignes établies, en s'appuyant sur la base de connaissances a priori (modèles cinématiques et dynamiques du robot [5]) et sur le retour d'état du module de PERCEPTION.
- ✓ Le module de SUPERVISION vérifie le bon déroulement des opérations, et établit des stratégies de secours en cas de diagnostics de fautes ou d'échecs (mode dégradé, changement d'itinéraire).

III.1.3. Structure d'un système dynamique hybride (SDH)

Un système SDH résulte de l'interaction entre un système continu et un système discret (SED). La partie continue est représentée par un ensemble de modèles continus. Elle est constituée d'une infinité de valeurs décrivant le comportement d'un phénomène physique tel que la température d'une pièce ou d'un objet, le niveau dans un réservoir ou la vitesse d'un mobile. L'évolution de la partie continue est caractérisée par un espace de temps continu et peut être représentée de différentes manières. Les modèles souvent utilisés sont : ceux à base d'équations différentielles ou encore de fonctions de transfert, ou de bond-graphs.

La partie discrète du système hybride est associée à un SED dont l'espace d'état est un ensemble discret fini, ou l'état discret ne change qu'à certains instants du temps de façon instantanée. Les transitions entre les états discrets sont associées à l'occurrence d'événements discrets tels que, l'instruction traitée par un processeur, un interrupteur ouvert ou fermé. Les modèles les plus classiques permettant de présenter les SED sont les automates à états finis et les Réseaux de Pétri (RdP).

L'interface entre ces deux parties traduit l'interaction entre la partie continue et la partie discrète du SDH. Par ailleurs, les signaux provenant de la partie continue déterminent par l'intermédiaire de l'interface les événements autorisant des transitions de l'état discret d'une situation vers une autre situation. Ce phénomène d'interaction entre ces deux types de dynamiques est appelé phénomène hybride.

Les phénomènes hybrides peuvent être déclenchés lorsque des variables continues atteignent certains seuils spécifiques. Ce fait se manifeste en faisant basculer le système à événements

discrets à un nouvel état et suivant cet état une action de transition est déclenchée. Ce phénomène est dit alors autonome [8].

Notre système étudié (le véhicule autonome) est un système hybride puisqu'il y a une interaction entre la variation de vitesse qui est un phénomène continu et le changement de contrôleur qui est un phénomène discret.

III.2. Modélisation du véhicule

III.2.1. Description du véhicule

Un véhicule (figure 3) est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte.



Figure 3. Véhicule autonome

Les axes du véhicule, illustrés par la figure 4, sont :

✓ *Le roulis*

Le roulis est un balancement latéral. Il s'agit tout simplement du fait que la voiture s'incline dans les virages. Par exemple, dans un virage à droite pris un peu trop vite, la voiture va davantage porter son poids sur les roues de gauche situées à l'extérieur du virage.

✓ *Le tangage*

Le tangage désigne le mouvement de la caisse autour d'un axe horizontal, perpendiculaire à l'axe véhicule et passant par le milieu de celui-ci.

✓ *Le lacet*

Le lacet est le mouvement de rotation horizontal du véhicule autour d'un axe vertical.

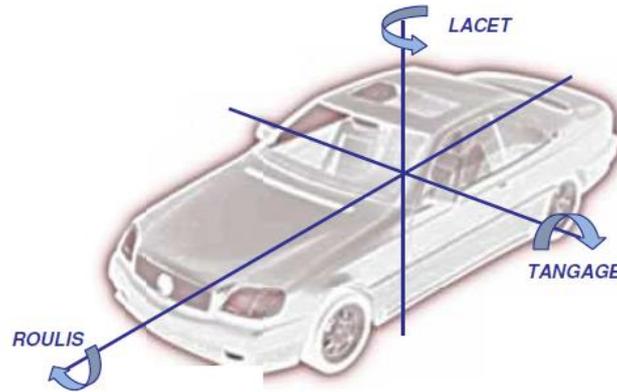


Figure 4. Les axes du véhicule

Le véhicule est un système qui peut être décomposé en deux sous-systèmes en interaction : le châssis ou caisse et d'un système de liaison au sol appelé actionneur comprenant : les pneumatiques, la direction, les trains et les suspensions l'actionneur.

Nous présenterons dans les paragraphes suivants les principaux modèles de ces deux sous-systèmes. Ces modèles s'appuient sur les références [16], [17].

III.2.2. Modélisation du châssis ou caisse

Le châssis (figure 5) est la structure métallique externe qui supporte et rigidifie tous les éléments constituant un véhicule. Elle contient le groupe moteur, le système de commande pilote : pédales, volant, levier de vitesse...



Figure 5. Châssis d'un véhicule

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles dont les principaux sont :

- les modèles bicyclettes
- les modèles de type 4 roues.

❖ Modèles de type 4-roues

Lors de sollicitation du véhicule dans des zones de comportement non linéaire, les modèles bicyclettes ne sont pas suffisants pour modéliser le comportement dynamique du véhicule. Les modèles de type 4-roues sont plus représentatifs pour de fortes sollicitations mais sont peu utilisés lors de la conception des applications automobiles embarquées à cause de leur complexité.

❖ Modèles bicyclettes

Ce sont les modèles les plus utilisés pour la génération de trajectoire et l'élaboration des lois de commande pour le contrôle du véhicule [16], [17]. Dans ces modèles, le roulis et le tangage sont négligés. Il est important de noter qu'on distingue principalement deux modèles bicyclettes: le modèle bicyclette cinématique et le modèle bicyclette dynamique.

➤ Modèle bicyclette cinématique

C'est un modèle purement géométrique et est utilisé pour de faibles vitesses ($<5\text{m/s}$) [16].

➤ Modèle bicyclette dynamique

Ce modèle (figure 6) est utilisé pour représenter le comportement latéral du véhicule [23] (vitesse de lacet r).

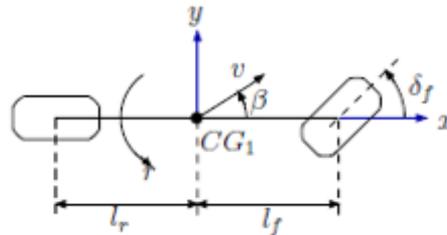


Figure 6. Modèle dynamique du véhicule

Avec :

- ✓ **β (Angle de dérive)**: Appelé encore angle de glissement du châssis au CG_1 . C'est l'angle de variation de trajectoire du véhicule due à la déformation transversale que subissent les pneumatiques quand ils sont soumis à l'action d'une force latérale. En pratique, cette force peut avoir diverses origines : vent latéral, force centrifuge en virage,...
- ✓ **r (Vitesse de lacet)** : C'est la vitesse angulaire du mouvement de rotation horizontal du mobile autour d'un axe vertical.

- ✓ δ_f (Angle de braquage de la roue avant) : C'est l'angle de rotation des roues avant autour de leurs axes verticaux.
- ✓ l_f, l_r : Distances des axes avant et arrière au centre de gravité (CG1))

Dans notre étude les dynamiques du roulis et du tangage sont négligées.

La représentation d'état du système étudié est donnée par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B u \\ y = C x + D u \end{cases}$$

Les matrices de l'espace d'état sont données par :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{(c_f+c_r)\bar{\mu}}{mv} & -\left(\frac{c_f l_f - c_r l_r}{mv^2} \bar{\mu} + 1\right) \\ -\frac{(c_f l_f - c_r l_r)\bar{\mu}}{J} & -\frac{(c_f l_f^2 + c_r l_r^2)\bar{\mu}}{Jv} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{c_f \bar{\mu}}{mv} & \frac{c_f l_f \bar{\mu}}{J} \end{bmatrix}^T, \quad C = [0 \quad 1], \quad D = 0$$

Où les valeurs nominales des paramètres du modèle sont données par :

- * $c_f = c_r$ = (Les rigidité en virage devant et derrière : c'est force latérale divisée par l'angle de glissement en radians pour les petits angles)
- * $l_f = 2.7$ m, $l_r = 0.3$ m (Les distances des essieux avant et arrière au centre de gravité (CG1))
- * $m = 1496$ kg (La masse du véhicule)
- * $J = 1925$ kg.m² (Le moment d'inertie du lacet)
- * $\bar{\mu} = 0.65$ (Le coefficient de friction de la route)
- * v : La vitesse mesurée du véhicule

Le vecteur d'état du système (x), le vecteur d'entrée (u) et le vecteur de sortie (y) sont donnés par :

$$x = [\beta \quad r]^T \quad (1)$$

$$u = \delta_f \quad (2)$$

$$y = r \quad (3)$$

III.2.3. Modélisation de l'actionneur

Cette partie contient les trains, l'essieu, la direction les pneumatiques, et les suspensions l'actionneur.

❖ *Le train*

Le train (figure 7) avant est l'ensemble des organes mécaniques d'un véhicule assurant la suspension et la direction des roues avant et le train arrière est l'ensemble des organes qui assurent la suspension et le guidage des roues arrière.



Figure 7. Train avant

❖ *L'essieu*

C'est l'ensemble des organes qui relie la roue au train à l'exception des éléments de directions et de suspensions. L'essieu assure la compatibilité avec l'environnement physique, les performances attendues et la sécurité d'utilisation.

❖ *Les suspensions*

La suspension (figure 8) est l'ensemble qui assure la liaison entre la roue et la caisse. Elle porte le véhicule, assure le contact entre les pneus et le sol, et isole le châssis des perturbations générées à l'interface roue-sol. Son rôle est d'assurer la bonne tenue de route et le confort des passagers en éliminant les fréquences de vibrations indésirables.



Figure 8. Suspension

❖ *La direction*

La direction se compose de la colonne de direction et de la crémaillère responsable de faire tourner les roues directrices.

❖ *Le pneumatique*

Le pneumatique (figure 9) est l'élément physique du véhicule en interaction avec le sol. Il doit assurer la sécurité d'utilisation et l'agrément de conduite.



Figure 9. Pneumatique du véhicule

Le modèle de l'actionneur du modèle étudié est donné par la fonction de transfert suivante :

$$G_a(s) = \frac{\omega_a^2}{\omega_a^2 + 2\zeta_a \omega_a s + s^2} \quad (4)$$

avec: $\omega_a = 3.4$ rad/s : Pulsation propre

$\zeta_a = 0.9$: Coefficient d'amortissement

IV. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le cadre du projet. On a présenté d'abord l'organisme d'accueil puis on a fait une étude du processus étudié. Cette étude s'intéresse initialement sur des généralités sur l'historique de la robotique mobile et les systèmes dynamiques hybrides ensuite une modélisation des deux parties du véhicule est donnée.

Chapitre 2

Etat de l'art de la commande H_∞

I. Introduction

Dans ce chapitre, on commence par un état de l'art sur la commande robuste et en particulier la commande de type H_∞ et on longe par l'application de ce dernier sur la commande latérale du véhicule autonome

II. Rappel sur la commande robuste

L'Automatique est une discipline scientifique qui vise à conférer à un dispositif donné, appelé système, des propriétés souhaitées et ce, requérant un minimum d'intervention humaine pour fonctionner : par exemple, le régulateur de vitesse d'une voiture a pour rôle de maintenir le véhicule à une vitesse donnée malgré des perturbations comme l'état de la route ou le vent.

Une telle discipline requiert d'attribuer un modèle au comportement du système (phase de modélisation) et de l'utiliser afin, d'une part, de mieux comprendre ce comportement (phase d'analyse) et d'autre part, d'agir sur le système dans le but d'améliorer ses propriétés, autrement dit de l'influencer de façon à ce qu'il se comporte d'une certaine façon (phase de commande).

Donc en pratique, l'automaticien est confronté à trois problèmes :

- Phase de modélisation
- Phase d'analyse
- Phase de commande

Pour résoudre ces problèmes pour un système et des propriétés données, les ingénieurs mettent en œuvre des méthodes mises au point par des chercheurs. Une méthode générale permettant

de résoudre un problème d'analyse ou de synthèse est toujours définie dans un contexte particulier, caractérise d'une part par la nature du modèle mathématique choisi pour représenter le système réel (qui n'est jamais connu exactement) et d'autre part, par la nature du comportement souhaité, défini dans le cahier des charges.

II.1. Le rôle du bouclage dans la commande

L'élaboration d'une loi de commande consiste à fournir au vecteur d'entrée de commande le signal nécessaire pour obtenir le comportement voulu du vecteur de sortie, en dépit des entrées de perturbation. Ceci consiste à mesurer les perturbations et les écarts entre le modèle et le procédé. C'est le principe même de la commande par bouclage dont le synoptique est donné ci-après.

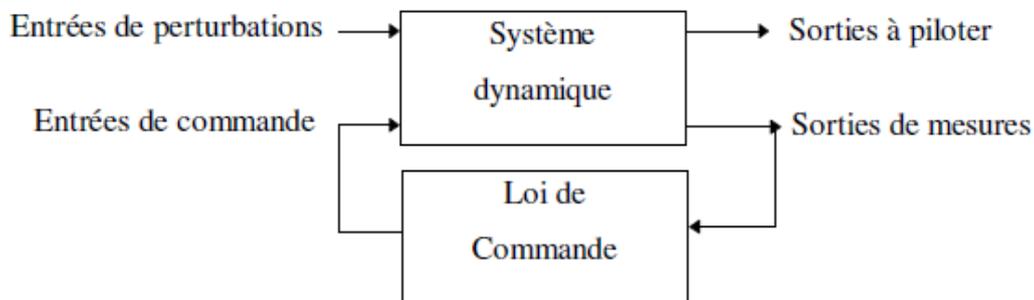


Figure 10. Bouclage du système et de la loi de commande

La commande d'un procédé en boucle fermée permet de rester dans un voisinage d'une trajectoire de référence malgré les perturbations et un certain niveau d'erreurs de modélisation. Autour de cette trajectoire la loi de commande est déterminée pour être stabilisante. Une telle loi de commande qui permet de garantir le bon fonctionnement du système réel, est appelée loi de commande robuste.

II.2. La théorie de la commande robuste

II.2.1. Insuffisance de la commande classique

La plupart des techniques de commande des systèmes linéaires sont basées sur la connaissance précise du modèle mathématique. Cependant, ceci n'est pas toujours possible car on est confronté à des imprécisions dues à [9]:

- La structure de modèle est toujours une simplification de la réalité
- Les paramètres du modèle sont entachés d'erreurs de mesure ou d'estimation
- Les paramètres peuvent varier avec le temps

- Si le modèle est la représentation linéarisée d'un système non-linéaire, le changement des conditions de fonctionnement modifie les valeurs des paramètres.

Les méthodes classiques comme PI, PID de la commande ont prouvé leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation ou de poursuite pour les systèmes linéaires mais lorsque le système est entaché à : des incertitudes, des perturbations ou des exigences sur les performances, dans ce cas, la commande classique devient insuffisante car elles ne sont pas robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités. On parle ainsi de la commande robuste.

II.2.2. Emergence de la commande robuste

Les années quatre-vingt ont été marquées par l'émergence de la notion de robustesse [10]. D'une manière générale, la robustesse d'une commande peut être définie comme une qualité qui décrit l'invariance de certaines propriétés qualitatives d'un système asservi (telles que la stabilité et les performances) à un certain nombre de phénomènes interne ou externe causant des incertitudes sur le modèle [10]. On dit d'un système qu'il est robuste s'il conserve sa stabilité et des performances acceptables malgré la présence des incertitudes.

Dans le cadre de notre travail, on s'intéressera particulièrement à l'utilisation de la méthode de commande avancée (robuste), qui a connu un essor remarquable durant ces dernières années car elle présente une solution plus performante aux problèmes cités auparavant.

Cette commande a concentré l'attention d'un nombre important de chercheurs à la fin des années 70. Elle est aujourd'hui, un axe de recherche prédominant notamment parmi les techniques dites 'robuste'. Elle est de plus en plus employée surtout lorsqu'on cherche à garantir la stabilité d'un système soumis à des incertitudes.

Donc, le défi majeur de notre travail de recherche est de concevoir une architecture de commande performante au niveau de la poursuite de trajectoires, le rejet de perturbations, la stabilité, et la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques.

II.3. Quelques types de commande robuste

Plusieurs types de commandes robustes ont été proposés dans la littérature dont on présentera les plus connus ci-dessous :

II.3.1. Commande floue

Le contrôle flou tire son nom des applications de contrôle ou de commande en automatique, mais il déborde maintenant ce cadre par ses multiples applications, partout où une modélisation mathématique est difficile. Le principe de cet algorithme de commande est très simple, il consiste à réaliser une interpolation entre un petit nombre de situations connues données par un expert sous la forme de règles floues du genre Si (X est A1) et (Y est A2) alors (U est B) :

Où A1, A2, B sont des prédicats mentionnés comme «grand positif», «moyen», «presque nul».

Cette méthode d'apprentissage a été appliquée dans le but d'avoir des systèmes de commande auto-adaptatif.

II.3.2. Commande par mode glissant

La théorie des modes glissants a été introduite à la fin des années soixante-dix par Utkin [11]. Actuellement, cette technique de commande connaît une large gamme d'applications dans des domaines très variés tels que la robotique, la mécanique et l'électrotechnique. L'algorithme de commande par mode de glissement est classifié dans les systèmes de contrôle à structure variable VSS (Variable Structure System), c.à.d des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes. L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la réponse dynamique rapide la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes.

La théorie des systèmes à structures variables (SSV) et les modes glissants (MG) associés (en anglais : sliding mode), est une technique de commande non linéaire. Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation, appelé encore « surface de glissement ». Son principe est de contraindre les trajectoires du système à atteindre une surface donnée, surface de glissement, pour ensuite y rester.

Toutefois, la commande par mode de glissement induit en pratique des commutations haute fréquence connue sous le nom de chattering. Ces commutations peuvent exciter des dynamiques non désirées qui risquent de déstabiliser, détériorer voire même de détruire le système étudié.

II.3.3. Commande synergétique

La théorie de commande synergétique a été introduite la première fois d'une façon générale par l'équipe de Kolesnikov. Récemment cette théorie a été appliquée avec succès dans le domaine de la commande dans l'électronique de puissance.

La commande synergétique est assez proche de la commande par mode glissant dans le sens où on force le système à une dynamique choisie par le concepteur. Elle en diffère dans le fait que la commande y est toujours continue, cette commande partage aussi avec la commande par mode glissant les propriétés de réduction d'ordre du système.

⇒ Les différentes lois de commande utilisées dans la littérature sont généralement utilisées sur des modèles et véhicules différents, suivant plusieurs critères permettant d'évaluer la robustesse : les variations de courbure de la route, les variations de vitesse, les variations de l'adhérence et les perturbations liées au vent, avec des hypothèses différentes, et validées principalement en simulation. Pour toutes ces raisons, il est difficile de faire une comparaison très objective de toutes ces lois de commande proposées dans la littérature.

En revanche, les résultats montrent clairement que les contrôleurs robustes du type H_∞ représentent des techniques prometteuses pour ce type d'application.

C'est cette commande qui va être retenue pour la suite de notre travail et on l'appliquera à la commande latérale du véhicule autonome.

III. La commande longitudinale et latérale

La commande du véhicule consiste à manœuvrer le véhicule en utilisant les actionneurs tels que le frein et l'accélérateur pour suivre la trajectoire de référence. Le véhicule est soumis à deux types de commandes : La commande longitudinale et latérale

III.1. La commande longitudinale

La commande longitudinale du véhicule revient en général à : assurer la commande de la vitesse longitudinale et/ou assurer la commande de la distance inter-véhiculaire, l'accélérateur et le frein étant les entrées de commande pour assurer ce cette commande.

Il est très difficile de donner un modèle général de l'ensemble "accélération/frein" permettant de modéliser le comportement longitudinal du véhicule, car cet ensemble est constitué d'organes (ou composants mécaniques) de caractéristiques très différentes d'un véhicule à l'autre. On utilise de ce fait, en général, un modèle cinématique pour décrire le comportement longitudinal d'un véhicule.

Plusieurs stratégies de commande longitudinale ont été proposées récemment parmi lesquelles nous pouvons citer :

- les contrôleurs PID
- les contrôleurs flous
- la commande par mode glissant

III.2. La commande latérale

La commande latérale d'un véhicule autonome consiste à imposer au véhicule de suivre automatiquement la trajectoire de référence en agissant sur l'angle de braquage. Il est étudié depuis les années 1950. C'est un domaine de recherche très actif. Compte tenu des incertitudes paramétriques et des perturbations rencontrées dans les applications automobiles, un des principaux enjeux aujourd'hui est de concevoir des lois de commande robustes capables de tenir compte de ces impératifs. Le contrôleur doit donc être performant malgré les perturbations, les incertitudes paramétriques,...

Dans ce travail on s'intéresse à la commande latérale de type H_∞ du véhicule.

IV. La commande latérale de type H_∞

La commande H_∞ (appelée encore commande avancée ou commande robuste multivariable) est une nouvelle approche du domaine de la commande robuste, elle a été initiée par Zames au début des années 80 et développée, en particulier par Doyle, Glover, Khargonekar et Francis [13], [14]. Elle est devenue ces dernières années une des méthodes phares de la « commande robuste » [15], elle est utilisée pour la mise au point rapide de lois de commande robustes des systèmes linéaires [10], [15]. L'approche H_∞ a donné lieu au plus grand nombre de publications et elle prend une place de plus en plus importante parmi les méthodes de synthèse de contrôleurs dans le domaine de la commande robuste. Cela n'est pas par hasard, en effet les résultats que cette approche permet d'obtenir sont très convaincants. La synthèse du contrôleur se fait algorithmiquement par résolution du problème d'optimisation en exploitant la puissance de calcul des ordinateurs actuels.

IV.1. Synthèse du contrôleur H_∞

Considérons une structure d'interconnexion quelconque dans laquelle on note par [18] :

- ✓ w le signal comprenant toutes les entrées qui affectent le système sans être influencées par le contrôleur. Ils peuvent être des consignes, des perturbations et des bruits de mesure.

- ✓ z le signal de sortie comprenant les signaux d'erreur à contrôler.
- ✓ y le signal comprenant les sorties mesurées disponibles pour élaborer la commande.
- ✓ u le signal de sortie du contrôleur.

L'interconnexion en boucle ouverte est alors représentée par la figure 11 :

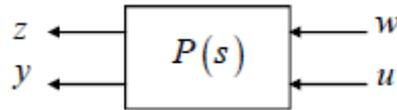


Figure 11. Le modèle généralisé

et est décrite par l'équation:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (5)$$

Le système $P(s)$ est formé des sous-systèmes intervenant dans l'interconnexion et de la manière dont ils sont liés les uns aux autres. En les partitionnant convenablement (de façon cohérente avec les dimensions de w , u , z et y), en quatre transferts MIMO, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

IV.1.1. Forme standard

La technique H_∞ exprime le problème de commande sous une forme systématique, dite forme standard, avec en entrée les perturbations et les commandes, et en sortie les grandeurs exprimant la robustesse, les performances recherchées, ainsi que les mesures [19]. La loi de commande à synthétiser est généralement un système dynamique LTI, telle que :

$$y_k = K u_k \quad (7)$$

En connectant le contrôleur $K(s)$ avec le système en boucle ouverte comme suit :

$$u_k = y \text{ et } u = y_k \quad (8)$$

Le schéma bloc représentant l'interconnexion en boucle fermée de $P(s)$ et $K(s)$ est ainsi :

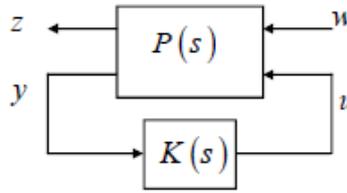


Figure 12. La forme standard

Et l'expression du transfert entre les entrées w et les sorties contrôlées z est donnée par la transformation fractionnelle linéaire (LFT) inférieure :

$$T_{zw}(s) = F_L(P,K) = P_{11}(s) + P_{12}(s) K(s) (I - P_{22}(s) K(s))^{-1} P_{21}(s)$$

De façon générale, l'ensemble des objectifs du problème de commande porte sur le transfert $F_L(P,K)$.

IV.1.2. Norme d'une matrice de transfert

▪ Valeurs singulières et matrice de transfert

Soit $G(s)$ une matrice de transfert entre un vecteur de signaux w et un autre vecteur de signaux e . Dans la terminologie fréquentielle, le transfert de w à e est tel que :

$$\underline{\sigma}(G(i\omega)) \leq \frac{\|e(i\omega)\|_2}{\|w(i\omega)\|_2} = \frac{\|G(i\omega)w(i\omega)\|_2}{\|w(i\omega)\|_2} \leq \bar{\sigma}(G(i\omega)). \quad (9)$$

Les scalaires σ sont appelés valeurs singulières de la matrice de transfert. Ces valeurs sont réelles, positives ou nulles et $\| \cdot \|$ est la norme 2.

Nous sommes ici dans le cas multi variable. L'amplification entre la norme de $w(i\omega)$ et celle de $e(i\omega)$ est comprise entre $\underline{\sigma}(G(i\omega))$ et $\bar{\sigma}(G(i\omega))$.

▪ Norme H_∞ d'une matrice de transfert

La norme H_∞ d'une matrice de transfert est une généralisation de la notion de norme H_∞ d'une fonction vectorielle à variable complexe. La norme H_∞ de $G(s)$ est définie par :

$$\|G\|_\infty = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(i\omega)). \quad (10)$$

IV.1.3. Le problème H_∞ standard

Le problème H_∞ consiste à synthétiser un contrôleur $K(s)$ qui minimise la norme H_∞ de la matrice de transfert $F_L(P,K)$. Ceci peut être formulé comme suit :

Pour un réel positif γ donné, trouver $K(s)$ stabilisant le système bouclé de manière interne et satisfaisant $\|F_L(P,K)\|_\infty < \gamma$.

IV.2. Résolution du problème H_∞

IV.2.1. Représentation d'état du système

La méthode de résolution du problème H_∞ standard utilise une représentation d'état de la matrice d'interconnexion $P(s)$, que nous écrivons sous la forme suivante [20][19]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

Avec $\dim(x) = n$, $\dim(w) = m_w$, $\dim(u) = m_u$, $\dim(z) = p_z$ et $\dim(y) = p_y$.

IV.2.2. Hypothèses

Dans la présente étude, l'approche choisie pour résoudre le problème H_∞ standard nécessite la vérification d'un certain nombre d'hypothèses [19]:

(H1) : La paire (A, B_2) est stabilisable et la paire (C_2, A) est détectable : c'est l'hypothèse classique de toute méthode utilisant les variables d'état. Elle garantit l'existence d'une loi de commande $K(s)$ stabilisant le système bouclé.

$$(H2) : \text{rang } D_{12} = m_u \quad (12)$$

Et

$$\text{rang } D_{22} = p_y \quad (13)$$

Cette hypothèse est une condition suffisante pour assurer que la matrice de transfert du contrôleur soit propre.

$$(H 3) : \forall \omega \in \mathcal{R}, \text{rang} \begin{bmatrix} A - j\omega I_n & B_2 \\ C_1 & D_{21} \end{bmatrix} = n + m_u \quad (14)$$

Cette hypothèse garantit que le transfert P_{12} n'a pas de zéro sur l'axe imaginaire.

$$(H 4) : \forall \omega \in \mathcal{R}, \text{rang} \begin{bmatrix} A - j\omega I_n & B_1 \\ C_2 & D_{21} \end{bmatrix} = n + p_y \quad (15)$$

Cette hypothèse garantit que le transfert P_{21} n'a pas de zéro sur l'axe imaginaire.

IV.2.3 Résolution par l'algorithme de Glover-Doyle

Une approche dichotomique (γ -itération) permet d'obtenir avec suffisamment d'itération γ :

Les étapes de l'algorithme de synthèse sont les suivantes :

- Fixer une valeur pour γ
- Voir s'il existe un contrôleur $K(s)$ tel que $\|F_L(P,K)\|_\infty < \gamma$
- Si oui, diminuer γ
- Sinon augmenter γ

Cette méthode, connue sous le nom d'algorithme de Glover-Doyle est en générale mise en œuvre numériquement sur un ordinateur et repose sur la résolution d'une série d'équations de Riccati. C'est la solution la plus simple et la plus fiable numériquement [20] [19].

Théorème 1 Conditions d'existence d'une loi de commande

Sous les hypothèses (H 1) - (H 4) le problème standard a une solution i.e., il existe un contrôleur $K(s)$ qui rend $\|F_L(P,K)\|_\infty < \gamma$ pour un $\gamma > 0$ donné, et assure la stabilité interne si et seulement si les conditions suivantes sont remplies [20][19].

i) La matrice Hamiltonienne

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ -C_1^T C_1 & -A^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

n'a pas de valeurs propres sur l'axe imaginaire.

ii) Il existe une matrice symétrique X_∞ telle que :

$$X_\infty = Ric(H_\infty) \quad (17)$$

Où X_∞ est solution de l'équation de Riccati suivante :

$$i.e., X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty + C_1^T C_1 = 0 \quad (18)$$

iii) La matrice Hamiltonienne

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \gamma^{-2} C_1 C_1^T - C_2 C_2^T \\ -B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix} \quad (19)$$

n'a pas de valeurs propres sur l'axe imaginaire.

iv) il existe une matrice symétrique $Y_\infty \geq 0$ telle que :

$$Y_\infty = Ric(J_\infty) \quad (20)$$

Où Y_∞ est solution de l'équation de Riccati suivante :

$$i.e \quad Y_\infty A + A^T Y_\infty + X_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0 \quad (21)$$

$$v) \rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2 \quad (22)$$

Où $\rho(\cdot)$ correspond au module de la plus grande valeur propre (rayon spectral) [21][19].

Le théorème suivant permet de paramétrer les contrôleurs qui conduisent à une norme H_∞ inférieure à γ .

Théorème 2

Si les conditions de i) à v) du théorème 1 sont satisfaites, le contrôleur robuste a pour forme :

$$K(s) = -F_\infty [(SI - A_\infty)^{-1}] Z_\infty L_\infty \quad (23)$$

Où :

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 + B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (24)$$

$$F_\infty = -B_2^T X_\infty \quad (25)$$

$$L_\infty = -Y_\infty C_2^T \quad (26)$$

$$Z_\infty = (I_n - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (26)$$

Remarque :

La méthode de résolution par l'algorithme de Glover-Doyle du problème H_∞ est purement théorique et sa mise en œuvre est très compliquée. De ce fait, en pratique la synthèse de ce type de contrôleur se fait moyennant la puissance des ordinateurs en utilisant Matlab et plus précisément la fonction `hinfsyn`.

V. Intérêts de la commande H_∞

1/ Contrairement aux outils fréquentiels classiques, les méthodes de synthèse H_∞ donnent des meilleurs résultats dans le cas MIMO.

2/ La performance est formalisée par un critère mathématique.

3/ Un algorithme numérique efficace permet de tester s'il existe un correcteur qui satisfasse le critère en un temps raisonnable: si oui, un contrôleur est alors proposé.

4/ La robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques est assurée.

VI. Les incertitudes du système**VI.1. Les sources d'incertitudes**

D'après [21], l'origine des incertitudes dans un système serait liée aux trois points cités ci-après:

- Une connaissance imparfaite des valeurs numériques des paramètres du modèle obtenu.
- Les approximations et les erreurs faites (volontairement ou pas) lors de la modélisation du procédé.
- La présence de certains phénomènes dans le comportement du système physique qui ne sont pas pris en compte directement par le modèle.

Dans notre cas d'étude, la source d'incertitudes est le changement des conditions de fonctionnement du système :

- Changement de la masse à cause des passagers (m)
- Changement du coefficient de glissement de la route ($\bar{\mu}$)

- Changement de la distance du centre de gravité aux axes (l_r et l_f) dans le cas de transport des passagers
- Changement de la rigidité en virage (c_f et c_r)
- Changement du moment d'inertie du lacet (J)

VI.2. Les différentes classes d'incertitudes

La description de l'incertitude peut être : structurée/ non structurée. Nous nous intéressons dans ce projet aux incertitudes structurées paramétriques en particulier :

✓ Incertitudes non structurées

Pour cette classe, aucune information sur la façon dont elles affectent le système n'est disponible. Toute variation paramétrique et toute dynamique négligée engendre une incertitude dont la structure est totalement inconnue [21] et contenue dans ΔA . Une majoration d'une norme matricielle de ΔA est alors utilisée et donnée par :

$$\|\Delta A\| \leq \Phi \quad (27)$$

Où Φ est un scalaire positif et $\| \cdot \|$ une norme généralement de type H_2 ou H_∞ [21]. La représentation non structurée, bien que peu élaborée, trop simple et considérablement pessimiste pour l'erreur, peut être d'un important intérêt vu qu'elle est capable de représenter toutes sortes d'imprécisions.

✓ Incertitudes structurées

Les incertitudes structurées [21][22], quant à elles, sont considérées plus représentatives sur la façon dont elles affectent les modèles. La nature du paramètre incertain est plus fidèlement représentée.

Dans notre cas on va considérer les incertitudes paramétriques: Ils représentent les incertitudes qui affectent les coefficients de la représentation d'état du système. Soit :

- $\theta = (\theta_1 \dots \theta_n)$: vecteur de paramètres

Ces variations proviennent soit du caractère incertain des paramètres de modélisation soit du domaine d'évolution de certains paramètres susceptibles d'évoluer dans de fortes proportions suivant les différentes configurations de fonctionnement du procédé.

On va considérer 2 types de paramètres : les paramètres variables (mesurables) et les autres qui sont incertains :

- ❖ Des paramètres mesurables et à évolution lente dans le temps : la vitesse
- ❖ Des paramètres inconnus (incertains) : la masse, le coefficient de glissement de la route, le moment d'inertie, la position du centre de gravité.

Pour le système étudié, la représentation incertaine pour un paramètre α est :

$$\alpha_p = \bar{\alpha} (1 + r_\alpha \boldsymbol{\delta}) \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] \quad (28)$$

Où :

- $\bar{\alpha}$: La valeur moyenne
- $r_\alpha = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} + \alpha_{\min}}$ (29)
- $\boldsymbol{\delta}$: est un coefficient tel que $\|\boldsymbol{\delta}\| \leq 1$

Dans les simulations faites, on considère les coefficients $\boldsymbol{\delta}$ suivants associés au différents paramètres :

- $\delta_{\bar{\mu}} = 0.5$: Le coefficient $\boldsymbol{\delta}$ du coefficient de friction de la route.
- $\delta_m = 1$: Le coefficient $\boldsymbol{\delta}$ de la masse.
- $\delta_{l_f} = 0.5$: Le coefficient $\boldsymbol{\delta}$ de la position du centre de gravité par rapport à l'axe avant.
- $\delta_{l_r} = 0.5$: Le coefficient $\boldsymbol{\delta}$ de la position du centre de gravité par rapport à l'axe arrière.

Puisque les paramètres J_f , m_f et l_f sont reliés par l'équation (30) donc J_f est considéré aussi comme un paramètre incertain :

- $J_f = m_f * l_f^2$ (30)

C'est le même cas pour J_r , m_r et l_r :

- $J_r = m_r * l_r^2$ (31)

c_f et $\bar{\mu}$ sont reliées par l'équation (32) donc c_f est aussi un paramètre incertain :

- $c_f = 2 * \frac{70}{\bar{\mu}} * \frac{10}{c}$ (32)

avec : $c = \pi/180$

- $c_r = c_f$ (33)

Donc c_f et c_r sont des paramètres incertains du système.

Avec :

$\bar{\mu}$: Le coefficient de friction de la route

J_f : L'inertie de l'essieu avant

J_r : L'inertie de l'essieu arrière

l_f : La position du centre de gravité par rapport à l'axe avant

l_r : La position du centre de gravité par rapport à l'axe arrière

m_f : La masse des passagers en avant

m_r : La masse des passagers en arrière

c_f : La rigidité en virage devant

c_r : La rigidité en virage arrière

VII. Cahier des charges

Notre système à étudier est un véhicule autonome pouvant naviguer dans plusieurs terrains et sous des conditions de fonctionnements différentes. Le système est entaché d'incertitudes sur la masse, le coefficient de glissement de la route, le moment d'inertie et la position du centre de gravité.

Le modèle du châssis du véhicule considéré est le modèle bicyclette dynamique qui tient compte des propriétés dynamiques du système.

Le but du travail est la commande latérale de type H_∞ du véhicule tout en assurant la robustesse et la stabilité du système face aux perturbations et incertitudes. Les interprétations des résultats obtenus seront réalisées en se basant sur des caractéristiques du système linéaire : le temps de réponse, le temps de montée et le dépassement.

VIII. Conclusion

Une étude bien détaillée de la commande robuste H_∞ a été faite dans ce chapitre. On a présenté au début la commande robuste et les types de cette commande les plus connus et les plus utilisés puis on a détaillé davantage la technique de commande H_∞ . La synthèse de ce type de contrôleur a été expliquée en mettant le problème de synthèse sous la forme standard puis le résoudre en suivant l'algorithme de Glover-Doyle. Les intérêts de ce type de commande ont été cités montrant ainsi les avantages de ce dernier. Enfin, les différentes incertitudes paramétriques du système ont été exposés.

Chapitre 3

Architecture de commande proposée

I. Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la troisième étape de la conduite autonome : la commande du véhicule, et plus précisément la commande latérale qui consiste à diriger automatiquement le véhicule à suivre la trajectoire de référence.

Compte tenu des incertitudes et des perturbations rencontrées, l'enjeu est de concevoir une loi de commande robuste capable de tenir compte de ces impératifs. Le contrôleur doit être capable de rejeter les perturbations causées par le vent, etc. Une architecture de contrôle est alors proposée afin d'assurer une commande robuste du système étudié : le véhicule autonome.

II. Problématique et travail demandé

Il s'agit de concevoir des contrôleurs robustes pouvant réagir à des perturbations soudaines comme un vent latéral, une route glacée, un virage... Ces effets peuvent conduire à des dangers et à l'instabilité du système.

Dans les travaux déjà réalisés, on ne considérait que le modèle cinématique et aucune incertitude n'a été prise en compte.

Le travail demandé consiste à considérer le modèle dynamique du véhicule tout en introduisant la notion d'incertitude. A la fin, il faut concevoir un système formé de différents contrôleurs et d'assurer la commande du véhicule en garantissant la stabilité et la robustesse face aux incertitudes et perturbations.

La commande latérale du véhicule se fait en considérant 3 contrôleurs. Chaque contrôleur est conçu pour fonctionner à une vitesse déterminée. Les 3 contrôleurs sont paramétrés aux vitesses respectives 2m/s, 8m/s et 16m/s. On suppose que la vitesse linéaire du véhicule est variable dans l'intervalle [1..20].

Dans un premier temps on considère les 3 contrôleurs pour commander le véhicule à différentes vitesses de l'intervalle déjà indiqué ci-dessus.

Des simulations ont été faites à différentes vitesses et en travaillant sur deux manœuvres : un échelon et une rampe + un échelon.

- Echelon : indique un changement soudain de la direction du véhicule puis il reprend sa direction initiale.
- Rampe + Echelon : indique l'entrée du véhicule dans un virage.

➔ Les deux manœuvres commencent de $t_0=2ms$ jusqu'à $t_f=7s$.

La vitesse de lacet est alors variable dans ces deux cas et c'est sur cette grandeur qu'on va focaliser notre étude :

- Le lacet est le mouvement de rotation horizontal d'un mobile autour d'un axe vertical et contribuant à le faire pivoter autour de cet axe.
- La vitesse angulaire de lacet est la vitesse de pivotement de ce mobile autour de ce même axe.

Pour analyser les performances du système, on considère 3 caractéristiques des systèmes linéaires : le temps de réponse, le temps de montée et le dépassement.

Les figures suivantes illustrent les vitesses de lacet calculées pour chaque cas avec différents contrôleurs et les tableaux de 1 à 5 résument les caractéristiques obtenus pour chaque manœuvre et à chaque vitesse :

▪ *1^{ère} manœuvre : Echelon*

Pour ce cas de manœuvre, on a calculé le temps de réponse et le dépassement pour différentes vitesses et en commandant le véhicule avec les trois contrôleurs à chaque fois.

$V_{\text{véhicule}}=3\text{m/s}$

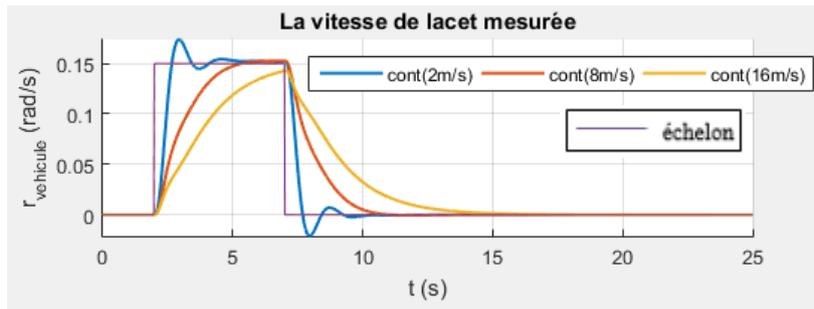


Figure 13. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=3\text{m/s}$)

Tableau 1. Caractéristiques du système à $V=3\text{m/s}$ (Echelon)

	Temps de réponse (en s à 63%)			Dépassement (%)		
	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)
$V_{\text{véhicule}} = 3 \text{ m/s}$	0.4368	1.1340	2.0770	15.84%	1.68%	0%

→ On remarque que le temps de réponse est le plus petit avec le contrôleur à 2m/s alors que le dépassement est le plus petit avec le contrôleur à 16m/s

$V_{\text{véhicule}} = 9\text{m/s}$

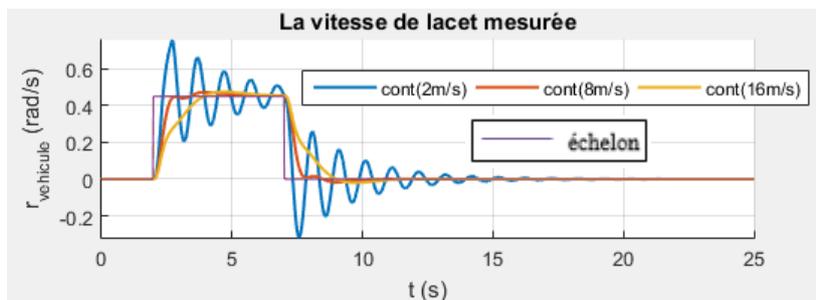


Figure 14. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 9\text{m/s}$)

Tableau 2. Caractéristiques du système à $V=9\text{m/s}$ (Echelon)

	Temps de réponse (en s à 63%)			Dépassement (%)		
	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)
$V_{\text{véhicule}}=9 \text{ m/s}$	0.2590	0.3970	0.7600	68.46%	5.38%	5.79%

→ On remarque que le temps de réponse est le plus petit avec le contrôleur à 2m/s alors que le dépassement est le plus petit avec le contrôleur à 8m/s

$V_{\text{véhicule}}=12\text{m/s}$

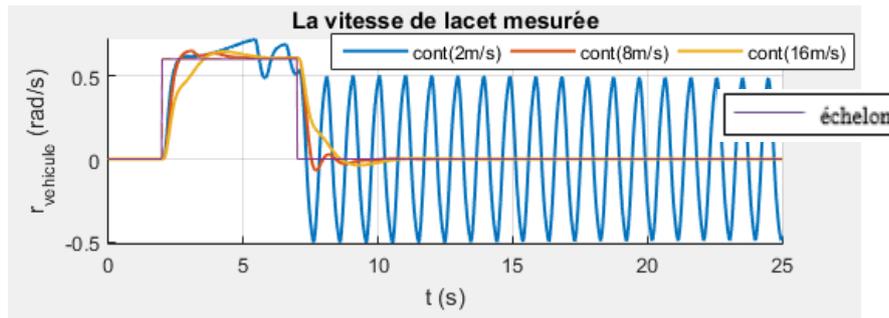


Figure 15. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=12\text{m/s}$)

Tableau 3. Caractéristiques du système à $V=12\text{m/s}$ (Echelon)

	Temps de réponse (en s à 63%)			Dépassement (%)		
	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)
$V_{\text{véhicule}}=12\text{ m/s}$	0.2730	0.3720	0.5050	19.83%	6.38%	7.48%

→ On remarque que le temps de réponse est le plus petit avec le contrôleur à 2m/s alors que le dépassement est le plus petit avec le contrôleur à 8m/s.

- ✓ Afin de garantir la stabilité et la robustesse du système face aux perturbations, il faut assurer à chaque changement de contrôleur le dépassement et le temps de réponse le plus petit possible.

▪ 2^{ème} manœuvre : Rampe + Echelon

Pour ce cas de manœuvre, on a calculé le temps de montée et le dépassement pour différentes vitesses et en commandant le véhicule avec les trois contrôleurs à chaque fois.

$V_{\text{véhicule}}=4\text{ m/s}$

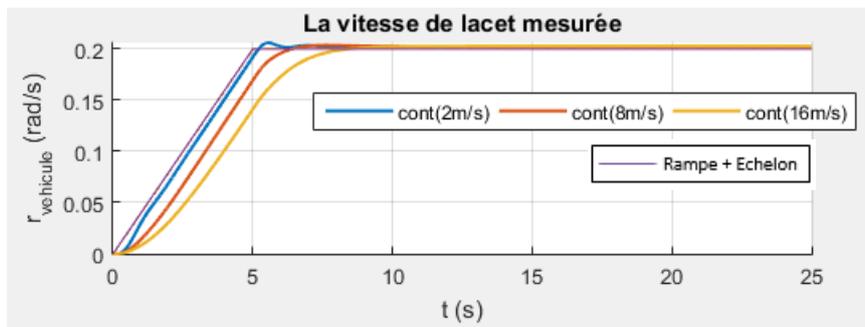


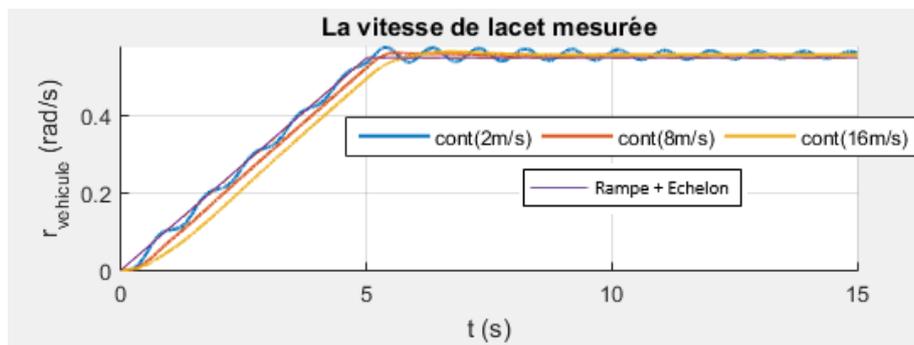
Figure 16. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=4\text{ m/s}$)

Tableau 4. Caractéristiques du système à $V=4\text{m/s}$ (Rampe + Echelon)

	Temps de montée (s)			Dépassement (%)		
	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)
$V_{\text{véhicule}}=4\text{m/s}$	3.9580	4.0750	4.7310	3.02%	1.80%	1.31%

→ On remarque que le temps de montée est le plus petit avec le contrôleur à 2m/s alors que le dépassement est le plus petit avec le contrôleur à 16m/s

✚ $V_{\text{véhicule}}=11\text{ m/s}$

**Figure 17. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}}=11\text{ m/s}$)****Tableau 5. Caractéristiques du système à $V=11\text{m/s}$ (Rampe + Echelon)**

	Temps de montée (en s)			Dépassement(%)		
	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)	Contrôleur (2 m/s)	Contrôleur (8 m/s)	Contrôleur (16 m/s)
$V_{\text{véhicule}}=11\text{ m/s}$	3.8970	3.9240	3.9420	4.80%	2.15 %	2.70%

→ On remarque que le temps de montée est le plus petit avec le contrôleur à 2m/s alors que le dépassement est le plus petit avec le contrôleur à 8m/s.

- ✓ Afin de garantir la stabilité et la robustesse du système face aux perturbations, il faut assurer à chaque changement de contrôleur le dépassement et le temps de montée le plus petit possible.

Le changement brusque de la vitesse du véhicule et donc la commutation brusque des contrôleurs entraîne l'instabilité du système justifiée par l'apparition d'oscillations et un dépassement ainsi qu'un temps de montée ou réponse important ce qui est expliqué par le fait que le système prend un temps pour atteindre le régime stable.

Afin de contourner ces problèmes, il faut assurer à chaque changement de contrôleur le dépassement et le temps de réponse le plus petit possible. C'est l'objet de la partie suivante.

III. Architecture proposée

III.1. Principe

En vue d'améliorer les performances de ce système en terme de (temps de réponse, temps de montée, dépassement) et surmonter le problème des oscillations, une architecture basée sur la fusion de contrôleurs est proposée.

La commande du véhicule sera alors assurée en fusionnant à chaque fois 2 contrôleurs moyennant une fonction d'interpolation. Cette fonction calcule à chaque fois 2 poids en fonction de la vitesse linéaire du véhicule. Les 2 contrôleurs vont être pondérés par ces poids et un nouveau contrôleur est alors obtenu et utilisé pour la commande du véhicule.

Ce nouveau contrôleur est déterminé en appliquant l'algorithme suivant :

- Mesurer la vitesse linéaire du véhicule: $V_{\text{véhicule}}$
- Appliquer l'algorithme de calcul des poids par la fonction d'interpolation
- Multiplier les poids calculés par les fonctions de transfert des deux contrôleurs

La fonction de transfert du contrôleur résultant sera la somme pondérée des fonctions de transferts des deux contrôleurs pondérés respectivement par les poids calculés par la fonction d'interpolation.

III.2. Fonction d'interpolation

Cette fonction consiste à calculer les deux poids qui seront multipliés par les deux fonctions de transfert des deux contrôleurs. Comme on va considérer 3 contrôleurs paramétrés aux vitesses respectifs : 2m/s, 8m/s et 16 m/s donc les intervalles qui sont pris en compte sont les intervalles : [2..8] et [8..16].

On a 2 poids à calculer :

P1 : Le poids du premier contrôleur

P2 : Le poids du deuxième contrôleur

1^{er} cas :

Si $2 < V_{\text{véhicule}} < 8$ ou $8 < V_{\text{véhicule}} < 16$:

$$P(C1) = \frac{|(V_{\text{c}}(C2) - V_{\text{véhicule}})|}{|(V_{\text{c}}(C2) - V_{\text{c}}(C1))|} \quad (40)$$

→ Poids du premier contrôleur (P1)

$$P(C2) = \frac{|(V_{\text{c}}(C1) - V_{\text{véhicule}})|}{|(V_{\text{c}}(C2) - V_{\text{c}}(C1))|} \quad (41)$$

→ Poids du deuxième contrôleur (P2)

Avec :

* $V_{\text{c}}(C1)$: la vitesse du premier contrôleur

* $V_{\text{c}}(C2)$: la vitesse du deuxième contrôleur

* $V_{\text{véhicule}}$: la vitesse du véhicule

2^{ème} cas :

Si $V_{\text{véhicule}} = 2\text{m/s}$ ou $V_{\text{véhicule}} = 8\text{m/s}$ ou $V_{\text{véhicule}} = 16\text{m/s}$

→ Le véhicule va être commandée par un seul contrôleur dont la vitesse est égale à la vitesse du véhicule.

III.3. Simulations et interprétations

Les simulations ont été faites pour comparer entre les résultats obtenus en considérant une commande adaptative et une commande non adaptative. La commande adaptative est celle qui fait la fusion des contrôleurs et l'autre commande prend à chaque fois le contrôleur dont la vitesse est plus proche de la vitesse du véhicule.

Exemple : Si $V_{\text{véhicule}} = 4\text{m/s}$ → Le contrôleur adaptatif est celui de 2m/s.

Si $V_{\text{véhicule}} = 11\text{m/s}$ → Le contrôleur adaptatif est celui de 8m/s.

Le temps de réponse, le temps de montée et le dépassement sont calculés à chaque fois en vue d'interpréter les résultats obtenus et montrer l'intérêt d'utiliser une telle fonction d'interpolation durant les deux manœuvres (l'échelon et la rampe).

Les résultats obtenus durant les deux manœuvres sont résumés dans les tableaux 6 et 7 :

III.3.1. 1^{ère} manœuvre : Echelon

Les résultats obtenus avant et après la fusion des contrôleurs, durant un échelon, sont en comparés et résumés dans le tableau suivant :

Tableau 6. Caractéristiques du système (Echelon)

Caractéristiques Vitesse (m/s)	Dépassement (%)			Temps de réponse (s)		
	Non adaptatif	Adaptatif	Amélioration	Non adaptatif	Adaptatif	Amélioration
1	0.0207 (2.07%)	0.0207 (2.07%)	0%	0.5680	0.5680	0
2	0.0207 (2.07%)	0.0207 (2.07%)	0%	0.5680	0.5680	0
3	0.1583 (15.83%)	0.1028 (10.28%)	+ 5.55%	0.4370	0.4680	- 0.031
4	0.2834 (28.34%)	0.1467 (14.67)	+ 13.67%	0.3700	0.4220	- 0.052
5	0.6417 (64.17%)	0.1550 (15.50%)	+ 48.67%	0.4010	0.3290	+ 0.072
6	0.1291 (12.91%)	0.0441 (4.41%)	+ 8.5%	0.5400	0.3950	+ 0.145
7	0.0662 (6.62%)	0.0482 (4.82%)	+1.8%	0.4750	0.4030	+ 0.072
8	0.0510 (5.10%)	0.0510 (5.10%)	0%	0.4300	0.4300	0
9	0.0532 (5.32%)	0.0525 (5.25%)	+0.07%	0.3970	0.4120	- 0.015
10	0.0568 (5.68%)	0.0555 (5.55%)	+ 0.13%	0.3720	0.3990	- 0.072
11	0.0841 (8.41%)	0.0601 (6.01%)	+2.4%	0.3520	0.3900	- 0.038
12	0.0859 (8.59%)	0.0638 (6.38)	+ 2.21%	0.3990	0.3720	+ 0.027
13	0.0841 (8.41%)	0.0601 (6.01%)	+ 2.4%	0.3900	0.3520	+ 0.038
14	0%	0%	0%	0.4330	0.4010	+ 0.032
15	0%	0%	0%	0.4720	0.4630	+ 0.009
16	0%	0%	0%	4.1980	4.1980	0
20	0%	0%	0%	4.2550	4.1980	+0.057

Quelques illustrations des vitesses de lacet mesurées sont données par les figures suivantes :

$V_{\text{véhicule}}=5\text{m/s}$

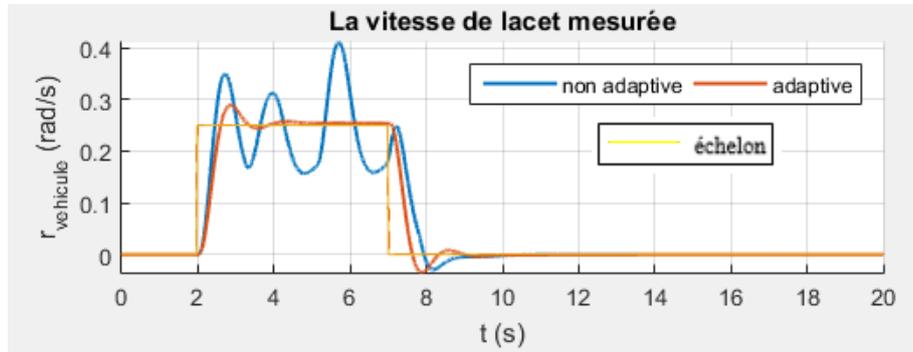


Figure 18. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 5\text{m/s}$)

$V_{\text{véhicule}}=10\text{m/s}$

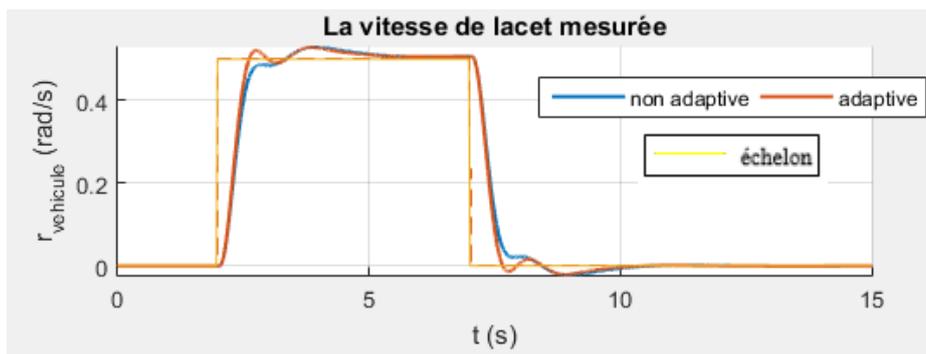


Figure 19. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 10\text{m/s}$)

$V_{\text{véhicule}}=12\text{m/s}$

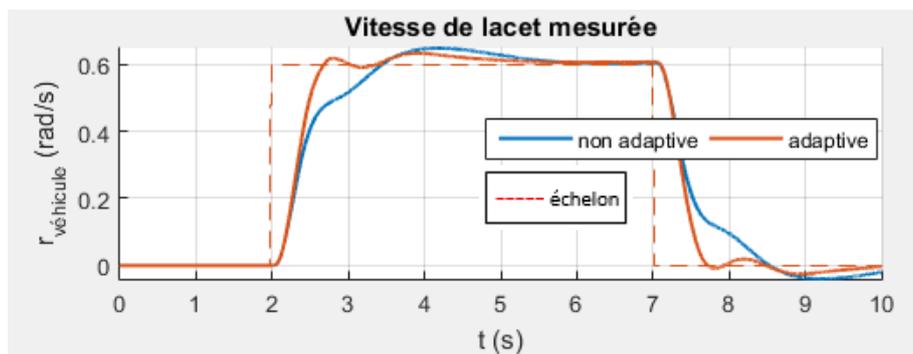


Figure 20. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 12\text{m/s}$)

III.3.2. 2^{ème} manœuvre : Rampe + Echelon

Les résultats obtenus avant et après la fusion des contrôleurs, durant la manœuvre (rampe+échelon), sont comparés et résumés dans le tableau suivant :

Tableau 7. Caractéristiques du système (Rampe + Echelon)

Caractéristiques Vitesse (m/s)	Dépassement (%)			Temps de montée (s)		
	Non adaptatif	Adaptatif	Amélioration	Non adaptatif	Adaptatif	Amélioration
1	0.0033 0.33%	0.0033 0.33%	0%	4.3140	4.3140	0
2	0.0033 0.33%	0.0033 0.33%	0%	4.3140	4.3140	0
3	0.0108 1.08%	0.0085 0.85%	+0.23%	3.9610	3.9660	- 0.005
4	0.0302 3.02%	0.0124 1.24%	+ 1.78%	3.9580	3.9020	+ 0.056
5	0.0196 1.96%	0.0145 1.45%	+ 0.51%	3.9640	3.9510	+ 0.013
6	0.0212 2.12%	0.0155 1.55%	+ 0.57%	3.9650	3.9450	+ 0.02
7	0.0214 2.14%	0.0156 1.56%	+ 0.58%	3.9450	3.9390	+ 0.006
8	0.0213 2.13%	0.0213 2.13%	0	3.9330	3.9330	0
9	0.0216 2.16%	0.0209 2.09%	+ 0.07%	3.9280	3.9270	+ 0.001
10	0.0220 2.2%	0.0205 2.05%	+ 0.15%	3.9250	3.9250	0
11	0.0215 2.15%	0.0225 2.25%	- 0.05%	3.9240	3.9230	+ 0.001
12	0.0234 2.34%	0.0233 2.33%	+ 0.01%	3.9250	3.9210	+ 0.004
13	0	0.0946 9.46%	+ 9.46%	3.9270	3.9190	+ 0.008
14	0.2155 21.55%	0.1640 16.4%	+ 5.15%	10.4530	9.7370	+ 0.716
15	0.1419 14.19%	0.1241 12.41%	+ 1.78%	10.7370	10.4670	+ 0.27
16	0.0496 4.96%	0.0496 4.96%	0%	11.6240	11.6240	0
20	0.0496 4.96%	0.0360 4.96%	+ 1.36%	12.8740	12.5320	- 0.342

Quelques illustrations des vitesses de lacet sont données par les figures suivantes :

$V_{\text{véhicule}}=4\text{m/s}$

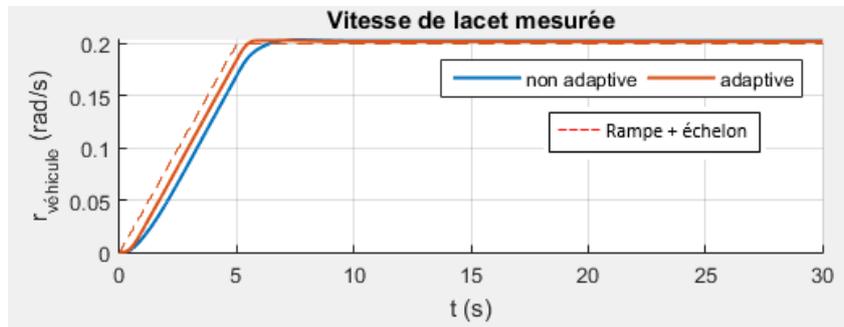


Figure 21. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 4\text{m/s}$)

$V_{\text{véhicule}}=7\text{m/s}$

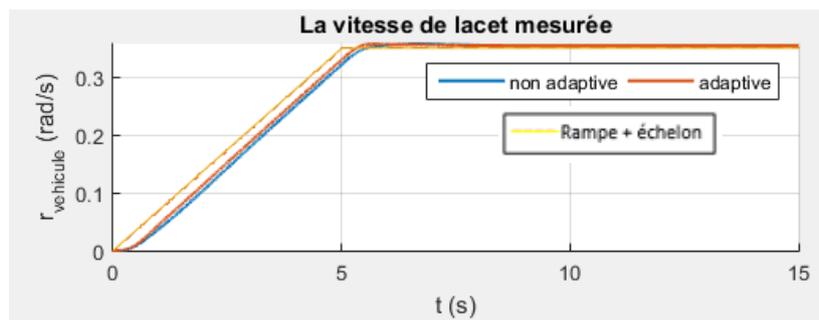


Figure 22. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 7\text{m/s}$)

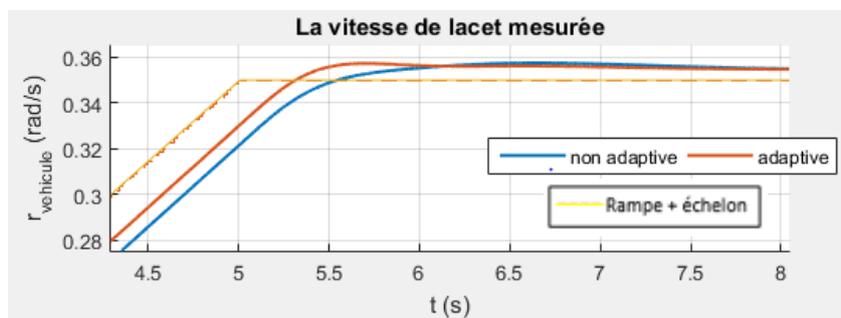


Figure 23. Zoom de la vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 7\text{m/s}$)

$V_{\text{véhicule}}=12\text{m/s}$

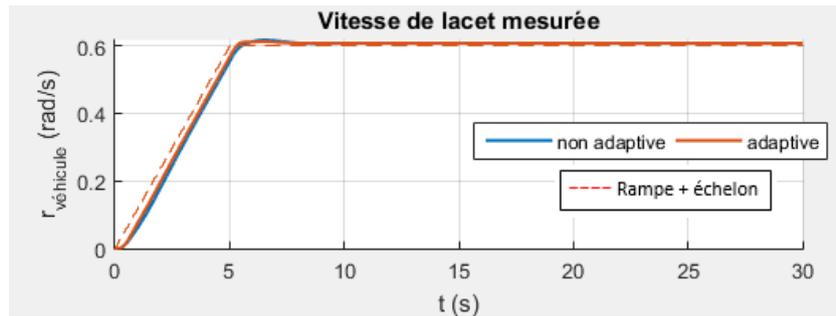


Figure 24. La vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 12\text{m/s}$)

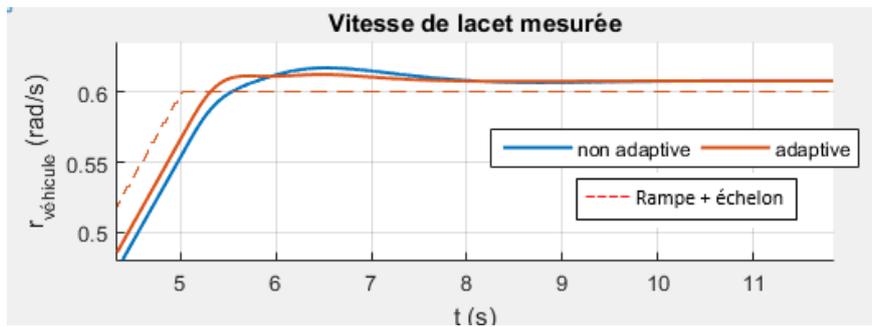


Figure 25. Zoom de la vitesse de lacet du véhicule ($V_{\text{véhicule}} = 12\text{m/s}$)

Interprétation des résultats :

La fusion des contrôleurs permet d'éliminer les oscillations des réponses du système durant les deux manœuvres. On a réussi à améliorer le temps de réponse et le dépassement dans le cas d'une entrée échelon et le temps de montée et le dépassement pour une entrée rampe + échelon.

Ceci améliore donc la stabilité du système et garantit sa robustesse face aux différentes perturbations et aux incertitudes.

- Durant la première manœuvre, le temps de réponse est amélioré pour les vitesses 5m/s, 6m/s, 7m/s et les vitesses allant de 12m/s à 20m/s. Alors que le dépassement est amélioré quasiment pour toutes les vitesses.
- Durant la deuxième manœuvre, le temps de montée et le dépassement sont améliorés tous les deux pour les différentes vitesses.

➔ Pour la première manœuvre, l'architecture proposée basée sur la fusion de contrôleurs peut être appliquée en cas d'évitement d'obstacle dynamique aux vitesses commençant de 12m/s. Pour les autres vitesses le contrôleur non adaptatif est meilleur à appliquer. On peut appliquer

également cette architecture en cas d'évitement d'obstacles statiques pour toutes les vitesses puisque le plus important dans ce cas c'est le dépassement du système.

→ Pour la deuxième manœuvre, l'architecture proposée peut être appliquée pour les deux cas d'obstacles statiques et dynamiques pour toutes les vitesses.

IV. Conclusion

L'architecture de contrôle proposée a donné de résultats considérables et a amélioré la robustesse du système durant les 2 cas de manœuvres malgré quelques cas où la commande adaptative n'était pas le meilleur choix.

Conclusion générale et perspectives

En considérant le dynamique du véhicule autonome, une architecture de commande latérale a été proposée et mis en œuvre en prenant en compte les incertitudes et des perturbations auxquels le système est soumis. Le contrôleur est capable de d'assurer la robustesse du système dans les conditions indésirables.

Un contrôleur robuste H_∞ a été d'abord conçu puis plusieurs contrôleurs à différentes vitesses ont été employés dans l'architecture de commande. On a réussi donc à assurer une commutation souple, suite au changement de vitesse, entre les différents contrôleurs par fusion de ces derniers

Des prochains travaux peuvent être abordés dans le cadre de ce travail : le système étudié peut être considéré comme un systèmes linéaire dont les matrices de la représentation d'état sont des fonctions d'un ou plusieurs paramètres qui peuvent être variants dans le temps. C'est pourquoi ces dernières années, l'étude des systèmes linéaires à paramètres variants dans le temps (LPV) (voir annexe A) a suscité un intérêt de plus en plus important en automatique.

Il est important de noter que, contrairement au cas LTI, les propriétés LPV sont globales et concernent les caractéristiques du système le long de toutes les trajectoires paramétriques possibles. Par contre, les propriétés LTI sont seulement locales et elles concernent les caractéristiques du système pour une valeur particulière des paramètres.

Annexe A

Les systèmes LPV

Un système LPV est un système linéaire et variable dans le temps.

Dans un système LPV, les matrices d'état A, B, C et D dépendent d'un vecteur des paramètres θ qui peut varier en fonction du temps et peut être mis sous la forme suivante :

$$\dot{x} = A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))u(t)$$

$$y = C(\theta(t))x(t) + D(\theta(t))u(t)$$

Où θ est un vecteur composé par des paramètres variables dans le temps. On connaît souvent des bornes sur ses différentes composantes de θ : $\underline{\theta}_k \leq \theta_k \leq \bar{\theta}_k$ et peut être aussi sur les vitesses de variation : $\underline{\dot{\theta}}_k \leq \dot{\theta}_k \leq \bar{\dot{\theta}}_k$.

Les éléments A(.), B(.), C(.) et D(.) de la représentation d'état sont des fonctions matricielles du vecteur de paramètres $\theta(t)$.

Bibliographie

- [1] : M. Taix. "Contribution à la planification de mouvements en robotique", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse, France, 2011.
- [2] : O. Lefebvre. "Navigation autonome sans collision pour robots mobiles non holonomes", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2006.
- [3] : C. Debain, P. Delmas, R. Lenain et R. Chapuis, "Integrity of an autonomous agricultural vehicle according to the definition of trajectory traversability", International Conference on Agricultural Engineering, Clermont- Ferrand, France, 2010.
- [4] : F. Ingrand, S. Lacroix et S. Chenevier, "Decisional autonomy of planetary rovers", Journal of Field Robotics, vol.35, no. 8, pp. 677–691, 2007.
- [5] : R. Lenain. "Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissements", Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand, France, 2005.
- [6] : J. Bergstra et A. Middelburg : "Continuity controlled hybrid automata", Conférence Internationale de Robots Intelligents et Systèmes, Taipei, Taiwan, 19-22 Octobre 2010.
- [7] : J. Antsaklis, Chapitre 14 : "Hybrid Systems: Review and Recent Progress", Livre : "Software-Enabled Control: Information Technology for Dynamical Systems", Janvier 2005, édition 2, pages 273-289.
- [8] : John.L, Claire Tomlin, and Shankar Sastry, Livre : "Hybrid Systems : Modeling, Analysis and Control", Décembre 2008, édition 2, pages 31- 43.
- [9] : K. Meskine, "Commande robuste floue des systèmes non linéaires incertains", Mémoire de Master, Université de Sétif, Algérie, 2010.
- [10] : A. Lahmer, "Implantation expérimentale de la commande robuste par un contrôleur H^∞ ", Mémoire de Master, Université de Batna, Algérie, 12 Janvier 2011.
- [11] : A. Benlatreche, "Contribution à la commande robuste de systèmes à grande échelle d'enroulement de bandes flexibles", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France, 2007.
- [12] : V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 22, n: 2, pages :212 – 222, 1977.
- [13] : L. Lavigne, "Outils d'analyse et de synthèse des lois de commande robustes des systèmes dynamiques plats", Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 17 Juin 2003.

- [14] : A. Benlatreche, “Contribution à la commande robuste de systèmes à grande échelle d’enroulement de bandes flexibles”, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 26 Janvier 2007.
- [15] : G. Scorletti, V. Fromion, “Introduction à la commande multivariable des systèmes : méthodes de synthèse fréquentielle”, Cours AU32 du Master Recherche ESCI 2A UFR de Sciences, Université de Caen/Basse Normandie, France, 2007.
- [16] : R. Rajamani, Livre : “Vehicle dynamics and control“, Janvier 2006, édition 2, pages : 15-46.
- [17] : L. Li et F.Wang, Livre : “Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles“, édition 2, pages : 77-86, Mars 2007.
- [18] : A. Damen and S. Weiland, “Robust Control”, Cours de Eindhoven University of Technology, les Pays-Bas, 2002.
- [19] : G. Duc et S. Font, Livre : “Commande H_∞ et μ -analyse : des outils pour la robustesse”, édition 1, pages : 50-66, Janvier 1999.
- [20] : G. Scorletti et V. Fromion, “Introduction à la commande multivariable des systèmes : méthodes de synthèse fréquentielle H_∞ ”, Cours de l’ENSI de Caen, septembre 2001.
- [21] : Aouani. N, “Commande Robuste des systèmes Linéaires continus à Paramètres Variant dans le temps“, Thèse de Doctorat en Informatique Industrielle, Université de Carthage, 2012.
- [22] : L. LAVIGNE, “Outils d’analyse et de synthèse des lois de commande robustes des systèmes dynamiques plats“, Thèse de Doctorat en automatique, L’Université Bordeaux I, France, 2003.
- [23] : Simon.H, “Robust H_∞ based vehicle steering control design“, International Conference on Control Applications, Munich, Allemagne, 4-6 Octobre 2006.