

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



FACULTE : TECHNOLOGIE

DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

N° :

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER ACADEMIQUE EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

THEME

Commande par Mode Glissant de la Suspension d'un Véhicule Automobile

Proposé et dirigé Par:

- Dr. OUAGUENI Fayssal

Réalisé par :

- BOUGUERRA Assala

- ZOURIG Nor Elhouda

Année universitaire : 2020 /2021

Dédicaces

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond
du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant là
et la reconnaissance durant toute notre existence.*

Je dédie ce modeste travail à :

- *L'amour de ma vie ma Chèremère 'Meftah Leila'*
- *Mon cherpère 'Moussa'*
- *Mes cher frères 'Tarik', 'Chouaib' et 'Abd El Hay'*
- *Mes chèresœurs 'Aya', et 'Djihad' enParticulier mon petit'Rahaf'*
- *Mon amour 'Noussiba', 'Zineb' et 'Mimouna'*
- *Et a toute la famille 'Zourig'et 'Meftah '*
- *Tous mes amis(e) et tous les autres.*
- *Sans oublier tous les professeurs.*

Dédicaces

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond
du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant là
et la reconnaissance durant toute notre existence.*

Je dédie ce modeste travail à :

- *L'amour de ma vie ma Chèremère 'Fadila Kjouani'*
- *Mon cherpère 'Noureddine'*
- *Mes cher frères 'Abd el Latif 'et 'Mohamed Youcef '*
- *Mes chèressœurs 'Dounya', 'Hadil', 'Meriem' et 'Manal'*
- *Mon amour 'Rania Tahraoui ', 'Bouchra Zaouali' et 'Nesrine Ammari'*
- *Et a toute la famille 'Bouguerra 'et 'Kjouani '*
- *Tous mes amis(e) et tous les autres.*
- *Sans oublier tous les professeurs.*

Remerciements

Avant toute chose, Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donnée courage, force et sur tout patience durant toutes ces années d'étude. Nous sommes très reconnaissantes à Dr. Fayssal OUAGUENI, pour avoir accepté de diriger nos travaux, et pour ses encouragements et son soutien qui nous ont été une aide précieuse.

Nous ne saurions oublier le Dr. Boudia Issam, nos amis, avec lesquelles nous avons partagé des très beaux moments. Merciet bonne chance à mes collègues dans le département de génie électrique, pour leurs amours et leurs confiances.

*Enfin, nous ne saurions
Jamais suffisant remercier nos mères, nos pères, mes frères et mes sœurs, que nous portons toujours avec nous dans notre pensée, sans leurs confiances immenses en nous, sans leurs aides et leurs amours, nous n'aurions pas pu aller au bout de nos projets.*

ملخص

تسبب التطور التكنولوجي في قطاع السيارات في مشاكل تتعلق بالراحة والأمن والتي كانت موضوعاً مهماً للدراسات الهندسية. تتولد العديد من الاهتزازات من العوامل الخارجية التي تحدث ، وتؤثر هذه الاهتزازات سلبيًا على الديناميكيات الداخلية للسيارة والراحة والسلامة. لتليين هذه الاهتزازات بشكل أفضل ، يلزم وجود وحدات تحكم للتعليق. في هذه الدراسة ، تم تصميم النموذج الرياضي لنظام التعليق الرباعي للمركبة بواسطة SIMULINK / MATLAB. بعد ذلك ، تم دمج النظام مع وحدة التحكم النسبي - المتكامل - المشتق (PID) والتحكم في الوضع المنزلق (SMC) بعد تطبيق اضطراب الطرق كمدخلات لوحدة التحكم ، يتم مقارنة أداء النظام بالنظام غير المتحكم فيه .

كلمات مفتاحية : التعليق النشط , PID , نظام ربع مركبة , التحكم في الوضع المنزلق.

Résumé

Le développement technologique dans le secteur automobile a causé des problèmes de confort et de sécurité qui étaient un sujet important pour les études d'ingénierie. De nombreuses vibrations provenant de facteurs externes qui se produisent, ces vibrations affectent négativement la dynamique interne, le confort et la sécurité du véhicule. Pour mieux amortir ces vibrations, des contrôleurs sont nécessaires pour les suspensions. Dans cette étude, le modèle mathématique du système de suspension du quart de véhicule est modélisé. Ensuite, le système a été combiné avec un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (PID) et un contrôle en mode glissant (SMC). Après avoir appliqué la perturbation des routes en tant qu'entrées aux contrôleurs, les performances du système sont comparées à celles du système non contrôlé.

Mots clés : PID, La commande par mode glissant, Suspension Active, Modèle quart de véhicule.

Abstract

Technological development in the automotive sector caused to comfort and security problems that was an important topic for engineering studies. Many vibrations sourced from external factors that occur, these vibrations adversely affect the vehicle's internal dynamics, comfort and safety. To better damp these vibrations, controllers are required for suspensions. In this study, the mathematical model of the quarter vehicle suspension system is modeled. Then, the system has been combined with proportional–integral–derivative controller (PID) and sliding mode control (SMC). After applying roads disturbance as inputs to the controllers, the performance of system is compared with uncontrolled system.

Keywords : PID, Sliding mode control, Active suspension, Quarter vehicle model.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur la suspension automobile

I.1. Introduction.....	4
I.2. Problématique	4
I.3. Historique sur les suspensions	5
I.4. Éléments d'un véhicule	5
I.5. Élément de la suspension automobile	6
I.6. Performances de la suspension	7
I.6.1. Confort.....	7
I.6.2. Débattement de la suspension	7
I.6.3. Tenue de route	7
I.6.4. Consommation d'énergie	7
I.7. Composants d'une suspension	8
I.7.1. Les ressorts	8
I.7.2. Les barres antiroulis	8
I.7.3. Les amortisseurs	9
I.7.4. Le pneumatique	10
I.7.4.1. Modèle verticale de pneu	10
I.7.4.2. Modèle horizontal de pneu	10
I.8. Influence de la suspension	12
I.9. Les catégories de la suspension	12
I.9.1. Suspension passive	12
I.9.2. Suspension semi-active	12
I.9.3. Suspension active	13
I.10. Modélisation de la suspension.....	14

I.10.1. Modèle d'un quart de véhicule ou mono roue.....	14
I.10.2. Modèle d'un demi-véhicule.....	17
I.10.3. Modèle d'un véhicule complet ou 3D.....	18
I.11. Architecture des suspensions courantes.....	19
I.11.1 Le Mac Pherson.....	19
I.11.2 Le double triangulation.....	19
I.11.3 Le multilink.....	20
I.12. Comparaison des performances des trois types de suspension.....	20
I.13. Validation du modèle de la suspension passive	21
I.14. Conclusion.....	23

Chapitre II : Commande par mode glissant

II.1. Introduction.....	24
II.2. Commande PID.....	24
II.2.1. Description des régulateurs PID.....	24
II.2.2. Le régulateur PID.....	25
II.2.3. Aspects fonctionnels du régulateur PID.....	26
II.3. La commande par mode glissant.....	26
II.3.1. Objectif de la commande par mode glissant.....	26
II.3.2. Différentes structures du contrôle par mode de glissement.....	26
II.3.2.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	27
II.3.2.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	27
II.3.2.3. Structure de régulation avec ajout de la commande équivalente.....	28
II.3.3. Principe de la commande par mode glissant.....	28
II.3.4. Système a structure variable.....	29
II.3.5. Conception de la commande par mode glissant.....	30
II.3.5.1. Choix des surfaces de glissement.....	31
II.3.5.2. Principe d'invariance.....	31
II.3.5.3. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant.....	32
II.3.5.4. Calcul de la commande.....	32
II.3.5.4.1. La commande équivalente	33
II.3.5.4.2. La commande discontinue de base.....	34
II.3.5.5. Le phénomène de chatterring	35

II.3.6. Domaine d'application du réglage par mode glissant.....	37
II.3.7. Les avantages de commande par mode glissant	37
II.4. Conclusion.....	38

Chapitre III : Commande par mode glissant de la suspension active

III.1. Introduction.....	39
III.2. Commande par mode glissant de la suspension active.....	39
III.2.1. Construction de la commande.....	39
III.2.2. Résultat de simulation.....	40
III.3. Conclusion.....	43

Conclusion générale.....	45
---------------------------------	-----------

Références Bibliographiques.....	46
----------------------------------	----

Liste des tableaux

Tableau I.1: Paramètres du modèle quart de véhicule.....	16
Tableau I.2: Les performances des trois types de suspension.....	21

Liste des figures

Figure I.1 : Eléments de la suspension.....	6
Figure I.2: Ressorts à lames.....	8
Figure I.3: Suspension avec ressort hélicoïdale.....	8
Figure I.4: La barre antiroulis.....	9
Figure I.5: Amortisseur hydraulique.....	9
Figure I.6: Modèle verticale de pneu dans un modèle quart de véhicule.....	10
Figure I.7: Impact d'un mauvais ou bon filtrage de la route sur les passagers du véhicule	11
Figure I.8: Dynamique de la caisse en fonction de la suspension.....	11
Figure I.9: Types de suspension d'un véhicule.....	13
Figure I.10 : Modèle de suspension	15
Figure I.11 : Modèle de quart de véhicule de deux degré de liberté.....	16
Figure I.12 : Modèle de suspension un demi-véhicule latéral à 4 degrés de liberté.....	17
Figure I.13 : Modèle d'un véhicule complet.....	18
Figure I.14 : Différentes architectures des suspensions des trains avant les plus utilisées sur les véhicules de nos jours.....	19
Figure I.15: Architectures de suspension des trains arrière.....	20
Figure I.16: Modèle de suspension passive sous Matlab/Simulink	22
Figure I.17: Perturbation de la route.....	22
Figure I.18: Déplacement vertical du châssis (x_1)	22
Figure I.19 : Déplacement vertical de la roue (x_2)	23
Figure II.1 : Structure de retour linéaire de la forme présent-passé-futur	25
Figure II.2: Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	27
Figure II.3: Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état	27
Figure II.4 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	28
Figure II.5 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	29
Figure II.6 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	30

Figure II.7: Schéma fonctionnelle de la commande équivalente	33
Figure II.8: Commande équivalente U_{eq}	34
Figure II.9: Fonction « <i>sign</i> »	35
Figure II.10 : commande <i>un</i> adoucie « <i>SAT</i> »	36
Figure II.11: Commande U_n intégrale.....	37
Figure III.1 : Commande de la suspension active (PID et SMC).....	41
Figure III.2 : Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route)	41
Figure III.3: Déplacement vertical du châssis.....	42
Figure III.4 : Vitesse de déplacement vertical du châssis	42
Figure III.5 : Vitesse relative	43

Liste des acronymes

Z_{caisse} : déplacement vertical de caisse (mase suspendue).

Z_{roue} : déplacement vertical de la roue (masse non-suspendue).

Z_{sol} : profil vertical de la route.

m_c : masse du quart de la caisse (kg).

K_p : raideur du pneumatique.

m_r : masse non-suspendue (roue) (kg).

$F_{\text{amortisseur}}$: la force appliquer par l'amortisseur.

F_r : la force d'amortissement équivalente du pneu.

k : la constante de raideur du ressort de la suspension.

k_r : la constant de raideur équivalente du pneumatique.

m : la masse suspendue (caisse).

Z_u : déplacement vertical du centre de gravité de la masse suspendue (caisse).

k_s : coefficient de rigidité vertical du ressort de la suspension (N/m).

$e(x) = x - \hat{x}$: l'écart entre la variable x à régler et sa référence \hat{x} ;

K_s : est une constante positive.

r : est l'ordre du système.

ΔA : le terme d'erreurs de modélisation.

$f(t)$: est une perturbation externe.

K : est le gain de la commande discontinue

Introduction générale

La suspension active est un type de suspension automobile ou le mouvement vertical des routes par rapport au châssis et il est responsable du confort de conduite et de la tenue de route car la suspension porte la carrosserie du véhicule et transmet toutes les forces entre le corps et la route.

Des efforts accrus pour améliorer les systèmes de confort et de sécurité en plus d'une consommation de carburant minimale à une efficacité maximale avec une technologie en constante évolution et changement. En cas de charge et de conduite (freinage, accélération, virages à grande vitesse) réagissent très rapidement aux souhaits et une meilleure tenue de route, sécurité et confort ne sont possibles que grâce à un système de suspension amélioré. Lorsque le véhicule est exposé à la rugosité de la route, il ne doit pas provoquer d'oscillations de grande amplitude et si cela se produit, elles doivent être absorbées dans les plus brefs délais. Le système de suspension offre un meilleur confort de conduite et une meilleure sécurité en plus de déplacer la carrosserie du véhicule et de transmettre tous les effets de la route. Une meilleure conduite en toute sécurité est assurée par le système de suspension du véhicule qui a été conçu correctement et aligné avec le mouvement du véhicule.

La variation de la charge des pneus est un affichage pour le contact avec la route et peut être utilisée pour spécifier une valeur quantitative pour la sécurité. Le confort de conduite est une irrégularité de surface liée, les forces aérodynamiques, les vibrations du moteur produites par le moteur et les vibrations de la transmission. L'accélération de la carrosserie est un critère clair pour le mouvement et les vibrations de la carrosserie.

La suspension active nécessite une quantité importante d'énergie externe pour générer les forces de contrôle requise, sa réalisation par des actionneurs soit hydro-pneumatique ou pneumatique qui fonctionnent en parallèle avec ressort et l'amortisseur. Cette catégorie offre de meilleures performances que la suspension passive qui ne peut pas commander et la suspension semi active l'objectif principal de la suspension active des vibrations de ce système est obtenu la sécurité et le confort des passagers en réduisant à zéro de l'accélération verticale de la cause de véhicule, Un actionneur intégré au système applique des forces de commande à la

carrosserie de véhicule pour réduire son accélération verticale se manière active ou semi active.

Des études réalisées dans la littérature dans ce domaine ont montré que diverses stratégies de contrôle ont été utilisées pour pouvoir faire un meilleur dumping tel que le contrôleur PID, le contrôle Skyhook, le contrôle par logique flou, le contrôle H_∞ , les systèmes de contrôle adaptatifs [1]. Andronic Florin et al. [2] ont créé des modèles mathématiques pour le système de suspension et ont développé un schéma fonctionnel dans Matlab/Simulink qui permet d'analyser les réponses de la suspension.

De nombreuses recherches sur le contrôle de la suspension active ont été effectuées. Le contrôle adaptatif en mode glissant a été étudié avec un mode glissant et une approche floue. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité du schéma de contrôle proposé pour un modèle de suspension active de demi-véhicule [3]. Une méthode de contrôle adaptatif du backstepping est utilisée dans une autre étude pour améliorer le confort de conduite sous les incertitudes des paramètres, les différents taux d'amortissement et les mouvements d'extension [4]. Dans une autre recherche, un algorithme de contrôle de mode glissant d'ordre supérieur non singulier dérivé récursif est utilisé pour le quart de suspension du véhicule afin d'améliorer les performances de la suspension [5]. Dans une autre étude, un contrôleur de mode glissant flou adaptatif auto-organisé amélioré a été développé pour les systèmes de suspension active et un travail expérimental a été réalisé [6].

Dans ce travail, il est déterminé comment les systèmes de suspension non contrôlés ont absorbé l'entrée de la route, puis la même entrée de la route est utilisée pour le contrôleur PID et le système de suspension basé sur le contrôleur SMC (Sliding Mode Controller), ce qui permet de comparer les performances dans les différentes conditions de route. En conséquence, les performances du PID et du SMC sont illustrées et discutées.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, trois chapitres et finalement une conclusion générale.

- Dans le premier chapitre, nous allons expliqué les types de suspensions de voiture (suspension active, suspension semi-active et suspension passive) avec une description du rôle et des critères d'évaluation des performance des suspensions de voiture, et nous allons également détaillé les différents modèles de véhicules, formes mécaniques et différents types de système de suspension.

- Le deuxième chapitre, présente la commande par mode glissant le principe, la théorie de la commande, comment calculer les lois de commande et l'inconvénient de cette commande avec de solutions proposées puis les domaines d'application et les avantages de cette technique.
- Le troisième chapitre, traite l'application de la commande par mode glissant et la commande PID à la suspension active. Les résultats des simulations ont été présentés et discutés.

Enfin, une conclusion générale résumant le travail, suivie de quelque perspectives pouvant s'inscrire dans la suite de ce travail.

I.1.Introduction

L'homme est toujours à la recherche d'une solution à ses problèmes quotidiens et du confort pour faciliter sa vie, et parmi ses problèmes, les différents niveaux de vibrations affectant la mécanique [7].

L'automobile est un ensemble de multitude organes composant un système physique complexe. Elle est accommoder suspension en raison des sollicitations principales c'est le profil vertical de la route qui dépend de ce profil mais aussi de vitesse.

Le premier but de la suspension d'un véhicule automobile est d'atténuer les perturbations (les vibrations ou bien les chocs) par stabiliser la caisse pourtant les imperfections de la route qui sont la cause des vibrations. Ces dernières sont nuisibles sur les passagers et le véhicule alors le rôle essentiel de la suspension est d'assurer le meilleur confort possible afin de soigner les organes de véhicule et les passagers mais elle a des influences comme le comportement des roues donc la tenue de route. Le système de suspension est composé de : des ressorts, des amortisseurs, des barres antiroulis reliant entre les roues et les pneumatique (très important).

Dans ce chapitre, nous parlons en générale à la suspension. Au début, nous commençons par une brève historique sur la suspension. Ensuite, nous parlons des éléments de la suspension en expliquant : leur rôle, leurs performances, leur composant, leur influence avec les catégories et la modélisation de système de véhicule automobile.

I.2. Problématique

La plupart des machines mécaniques sont soumises à différents niveaux de vibrations provenant de sources variées. Les automobiles, comme toutes les machines mécaniques, n'échappent pas à ce phénomène et c'est pour cette raison que toutes les automobiles sont munies de suspensions. La suspension automobile a pour but de réduire et ultimement d'éliminer ces vibrations qui sont néfastes pour les passagers et pour le véhicule [8].

Les suspensions automobiles traditionnelles ont fait l'objet de nombreuses recherches pour optimiser leurs performances. Dans les dernières années, plusieurs travaux ont démontré que la façon la plus réaliste d'améliorer les performances des suspensions modernes est l'ajout de systèmes actifs. Le but de ce travail est de mieux comprendre ce type de suspension et plus précisément de développer des stratégies de contrôle efficaces en fonction des différentes contraintes relatives au domaine des véhicules automobiles [8].

I.3. Historique sur les suspensions

Pendant des siècles, les premiers véhicules n'ont pas été équipés d'aucune sorte de suspension. Seulement plus tard, au huitième siècle, avait lieu une suspension primitive basée sur un système développé de chaîne de fer. Des ressorts en métal ont été développés pour la première fois au 17^{ième} siècle et peu après ressorts a lame. De diverses conceptions sont été élaborées jusqu'au siècle dernier, qui a vu le développement du concept de la suspension basée sur un ressort et un amortisseur [8].

Les débuts des études sur le domaine du véhicule remontent aux années 1920 et aux années 1930. La recherche sur la dynamique de manipulation et de direction a été suivie plus tard dans les années 1950 comme rapporté par Milliken WF et Milliken DL 1995, la théorie aléatoire de vibration de l'étude du véhicule a été appliquée. L'optimisation des suspensions est réalisée non seulement par l'intermédiaire d'une conception et d'un accord soigné ; des ressorts et des amortisseurs, mais également en améliorant la conception des autres composants des suspensions (par exemple, les buissons en caoutchouc et les supports), afin d'améliorer et d'atténuer l'exploitation de leurs propriétés et d'obtenir une amélioration globale de tout [8].

Les suspensions commandées (actif et semi-actif) ont fait appel à des ingénieurs automobiles pendant beaucoup de décennies. Des amortisseurs semi-actifs ont été développés par des fabricants tels que ZF Sachs. Maintenant beaucoup de véhicules offrent un certain genre de suspensions commandées. Des suspensions actives ont été développées la première fois pour des voitures Lotus en 1983. En plus des voitures de course, des systèmes actifs ont été étudiés pendant longtemps et également développés pour les véhicules routiers (typiquement voitures de ville). Mercedes agit pendant des années sur les suspensions actives. Le coupé de CL de Mercedes Cross en 1999 équipé de commande entièrement intégrée de suspension et de traction. Dans le Toyota Celica par Yokoya et autre en 1990, est généralement équipée par des suspensions semi-actives [8].

I.4. Éléments d'un véhicule

Le véhicule est une structure mécanique composée de différents éléments :

- Le châssis est une structure métallique externe. C'est le corps principal du véhicule. Son mouvement par rapport au sol, est caractérisé par trois translations (longitudinale, latérale et verticale) et trois rotations (roulis, tangage et lacet). Le châssis est également

- appelé masse suspendue dans la modélisation, car il se trouve au-dessus des suspensions [8].
- Les éléments pour le contrôle longitudinal sont : le groupe motopropulseur (moteur, embrayage, boîte de vitesse et transmission), le système de freinage, les roues et les pneumatiques, ce qui permet au véhicule d'accélérer et freiner [8].
 - Les éléments pour le contrôle latéral sont : le volant, la colonne de direction, les roues et les pneumatiques. Ces éléments permettent au véhicule de tourner.
 - La suspension est composée de ressorts et d'amortisseurs. Elle assure la liaison verticale entre la roue et le châssis. Elle permet la tenue de route du véhicule et le confort des passagers [8].

I.5.Élément de la suspension automobile

Le premier but de la suspension automobile est d'atténuer les perturbations causées par les imperfections de la route et idéalement d'éliminer les vibrations néfastes pour le véhicule et pour les passagers afin d'assurer un meilleur confort et bien-être des passagers dans le véhicule, et de protéger les organes du véhicule.

La fonction et la forme de base d'une suspension est identique indépendamment du type du véhicule ou de suspension. Le système de suspension traditionnel est constitué d'un ressort et d'un amortisseur hydraulique. Certains véhicules sont dotés de barres antiroulis qui relient les deux roues (droite et gauche) de l'avant (et/ou) de l'arrière du véhicule. Le pneumatique représente un élément très important, qui est commun à tous les modèles de véhicules (quart, demi) [9].

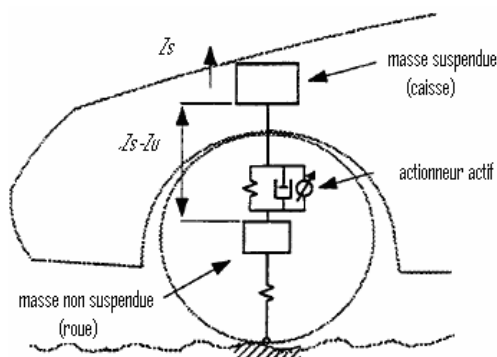


Figure I.1 : Eléments de la suspension

I.6. Performances de la suspension

Le rôle de la suspension d'un véhicule automobile est d'assurer le meilleur confort possible aux passagers, en stabilisant la caisse malgré les imperfections de la route, tout en assurant un niveau de sécurité optimal. Pour atteindre un tel objectif, un compromis est nécessaire entre confort et tenue de route, suivant le type de suspension utilisée (passive, semi-active et active), différentes performances sont atteintes, la sécurité et le confort des passagers [9].

I.6.1. Confort

Le confort correspond à l'équilibre vertical du véhicule et caractérise sa capacité à transmettre et à filtrer les vibrations principalement issues des irrégularités de la route aux passagers. Comme évoqué auparavant, un passager peut ressentir plusieurs types de malaise, selon l'accélération et les vibrations verticales transmises au passager. Les mouvements de tangage et de roulis ressentis par l'oreille interne sont aussi une source de malaise. La recherche du confort passe par la diminution des mouvements de la caisse.

I.6.2. Débattement de la suspension

Technologiquement, les éléments constituant la suspension d'un véhicule disposent d'un débattement limité. Afin d'éviter les chocs qui surviennent lorsque la suspension arrive en fin de course, les lois de commande élaborées doivent prendre en compte le débattement maximal des suspensions. Le but est donc de contraindre le débattement à rester dans un certain intervalle.

I.6.3. Tenue de route

La tenue de route traduit l'équilibre latéral du véhicule en virage ou lors d'un changement de direction, mais aussi sa capacité à fournir une force longitudinale (en cas d'accélération ou de freinage) et/ou latérale (en cas de virage) entre le pneu et la route pour résister aux perturbations extérieures ou répondre à des commandes du conducteur [9].

I.6.4. Consommation d'énergie

La consommation d'énergie par la suspension active est un autre facteur très important. La production de la force de commande par l'actionneur est conditionnée par la fourniture de l'énergie suffisante et ceci n'est possible que par la présence d'une source d'énergie extérieure. Plusieurs études ont abordé ce problème et même si certains ont essayé de

développer des actionneurs “auto-générateurs” d’énergie, il reste beaucoup à faire dans ce domaine.

I.7. Composants d’une suspension

De nombreux composants sont implantés dans la suspension, ces éléments possèdent des rôles différents mais surtout complémentaires. Les principaux sont listés ci-dessous :

I.7.1. Les ressorts

Monté précontraint en parallèle avec l’amortisseur. Le rôle essentiel du ressort dans le système de la suspension d’un véhicule est de soutenir le poids statique du véhicule. Il existe différents types de ressorts. Les ressorts hélicoïdaux sont couramment rencontrés sur les véhicules légers. Les ressorts à lames se trouvent surtout sur des véhicules lourds ou sur certains véhicules utilitaires. Des technologies récentes ont introduit des ressorts pneumatiques sur les véhicules poids lourds. Du fait de son coût et sa complexité, cette innovation est réservée aux véhicules de haute gamme [9].



Figure I.2: Ressorts à lames



Figure I.3: Suspension avec ressort hélicoïdale

I.7.2. Les barres antiroulis

C’est une barre de métal travaillant en torsion, qui raccorde transversalement les suspensions (avant et/ou arrière) de la voiture, et dont la fonction est de freiner les inclinaisons latérales (roulis) dans un virage. Il est à noter que cette barre n’a pas d’effet si les deux roues bougent indépendamment en même temps.

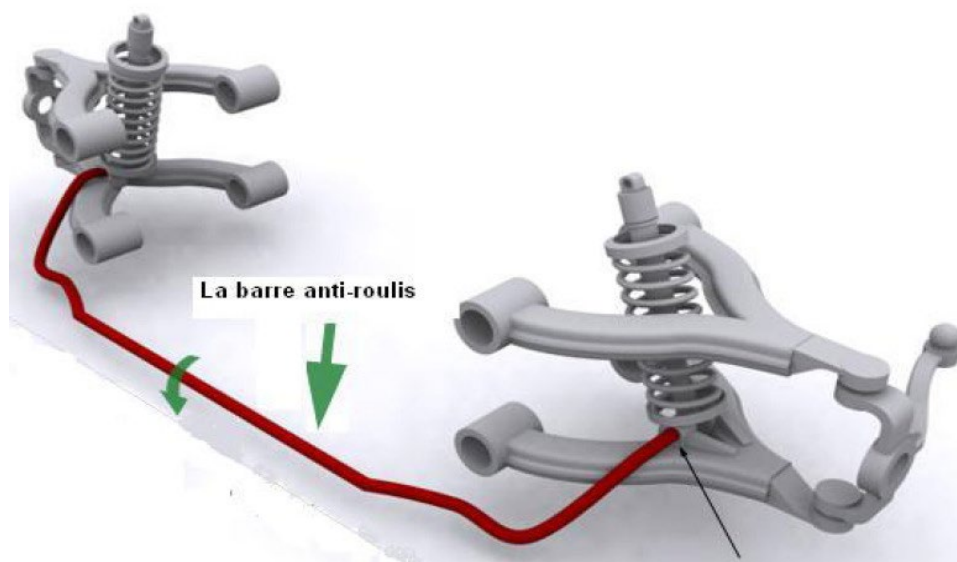


Figure I.4: La barre anti-roulis

I.7.3. Les amortisseurs

L'amortisseur hydraulique s'est imposé aujourd'hui de manière quasi-universelle, le plus souvent dans sa forme télescopique, soit bitube, soit monotube. Le rôle d'un amortisseur est d'absorber l'énergie vibratoire et de commander en générant une force de résistance proportionnelle à la vitesse de déflexion. Les amortisseurs circulent dans une enceinte fermée. Le freinage des mouvements (vibration) est réalisé par l'huile qui passe d'un piston à l'autre avec plus ou moins de facilité.



Figure I.5: Amortisseur hydraulique

Tous ces éléments fonctionnent afin d'assurer les tâches suivantes :

- Absorption des différents chocs.
- Elimination des vibrations.
- Support du poids du véhicule et de sa charge.

- Tenue de route (contact permanent avec la chaussée).
- Précision de la direction et puissance du freinage.
- Empêcher le roulis, tangage et lacet (mouvements indésirables).

I.7.4. Le pneumatique

Le pneumatique est l'interface entre le véhicule et la route. Il permet de transmettre au véhicule les forces exercées par la route. Celles-ci sont de deux types, vertical ou horizontal. La force verticale permet de soutenir le véhicule tandis que les forces horizontales permettent de le diriger. Le pneu est un élément très complexe qui est soumis à de fortes sollicitations et à de grandes variations de température. Les fabricants de pneumatique utilisent sans doute des modèles plus complets prenant en compte toutes les déformations du pneu. Les but est seulement ici de décrire l'influence du pneu dans le comportement dynamique du véhicule [10].

I.7.4.1. Modèle verticale de pneu

Ce type de modèle est linéaire et pourra être utilisé dans synthèse des lois de commande. Cependant, si l'on souhaite obtenir un modèle de simulation plus fin que le modèle de synthèse, on peut envisager de prendre une raideur non-linéaire représentant la caractéristique plastique du ressort [10].

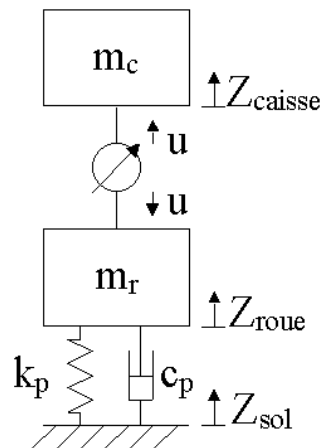


Figure I.6: Modèle verticale de pneu dans un modèle quart de véhicule [11].

I.7.4.2. Modèle horizontal de pneu

Le modèle horizontal, non-linéaire beaucoup plus compliqué n'est utilisé que pour les simulations plus réalistes, entre autres, pour la validation de la loi de commande [10].

I.8. Influence de la suspension

Un mauvais choix de la suspension peut provoquer des réactions physiologiques sur l'être humain, pour cela nous devons mettre à la fois le ressort et l'amortisseur en reliant la caisse avec la roue, le rôle du ressort est pour absorber de l'énergie mécanique à cause des vibrations, aussi l'amortisseur a un but d'absorber l'énergie mais l'énergie qui est provoqué par le ressort, alors que tous les deux ont un rôle intégré pour l'atténuation des vibrations sur l'automobile (Figure I.7) [7].

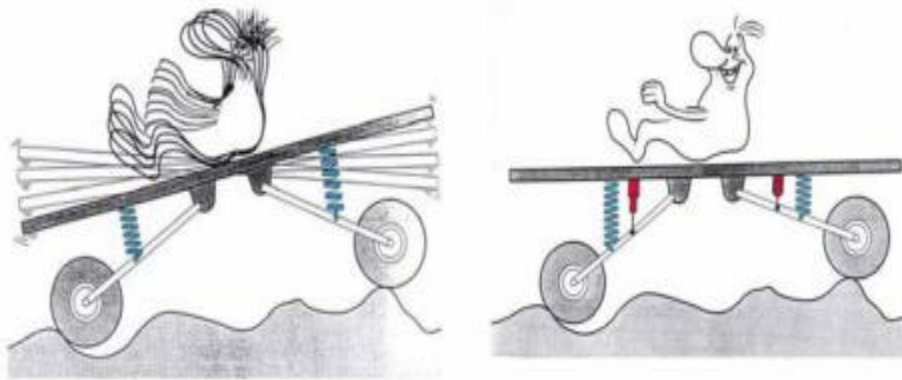


Figure I.7: Impact d'un mauvais ou bon filtrage de la route sur les passagers du véhicule

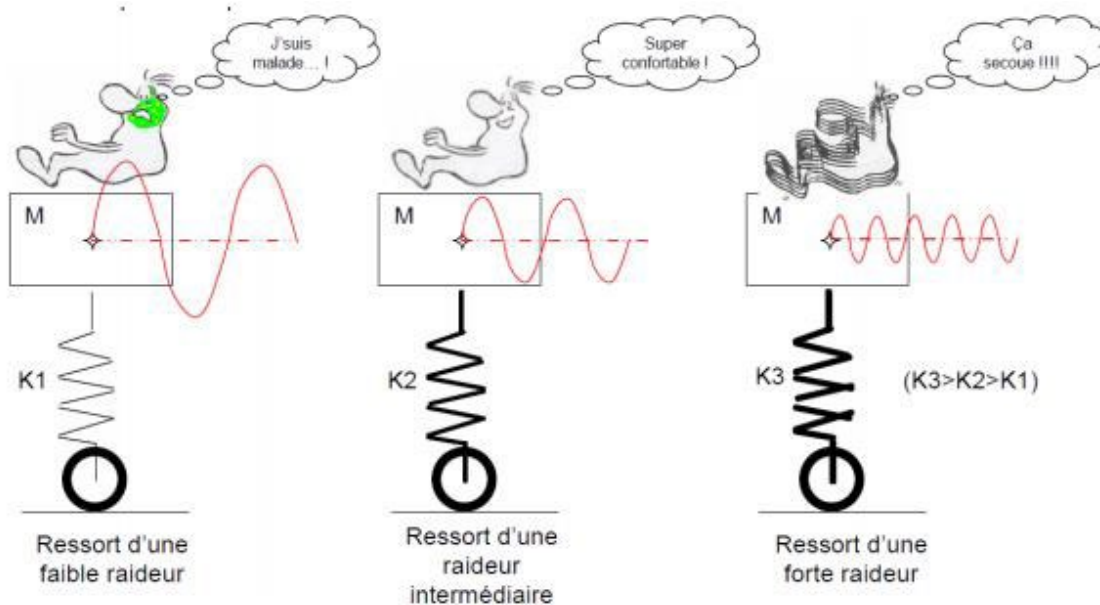


Figure I.8: Dynamique de la caisse en fonction de la suspension.

La fréquence de résonance (fréquence pour laquelle le gain du transfert Caisse/Roue est maximal) fixe l'ordre de grandeur de la fréquence au-delà de laquelle il y a filtrage. Ainsi, plus la fréquence de résonance est élevée, plus le filtrage est mauvais. De plus, si la fréquence

de résonance est élevée alors les mouvements de la caisse sont rapides. Or l'être humain est particulièrement sensible aux fréquences en dessous de 1Hz et au-delà de 2Hz. La réponse fréquentielle du transfert Caisse/Route apporte donc, énormément d'information sur les aspects confort d'un véhicule (Figure I.8) [7].

I.9. Les catégories de la suspension

La suspension désigne l'ensemble des éléments mécaniques qui relient les roues à la structure principale d'un véhicule (caisse). Il existe trois types de suspensions : la suspension passive, la suspension semi-active et la suspension active [12].

I.9.1. Suspension passive

D'une manière générale, ceci concerne un support parallèle d'un ressort et d'un amortisseur. La suspension passive est linéaire en nature. Elle est basée sur le principe de la dissipation d'énergie par l'amortisseur. La force agissante sur le corps de voiture résulte du mouvement relatif et de la vitesse relative de la suspension [12].

Traditionnellement, l'isolement de vibration est accompli par l'insertion de l'élément linéaire de rigidité (le ressort) et d'un élément d'atténuation linéaire (l'amortisseur) entre la source de vibration et le système exigeant la protection. Dans le cas de la suspension passive, la rigidité et l'amortissement sont des caractéristiques d'élément, à savoir k et c , qui ne peuvent pas être changées une fois choisies. Par conséquent, il est nécessaire de choisir les composants soigneusement afin de fournir la meilleure performance [12].

Bien que ce type de suspension soit couramment employé par la plupart des fabricants, ces derniers ne donnent pas une satisfaction au point de vue confort du véhicule routier.

L'augmentation du coefficient d'amortissement de la suspension passive augmente le confort du véhicule. Ce qui provoque l'augmentation de débattements de roue, Cela conduit à la diminution de la qualité du contact route/pneu. Ces limitations sur la performance de suspension passive ont mené à l'exécution d'autre type de systèmes de suspensions (Figure I.9.a).

I.9.2. Suspension semi-active

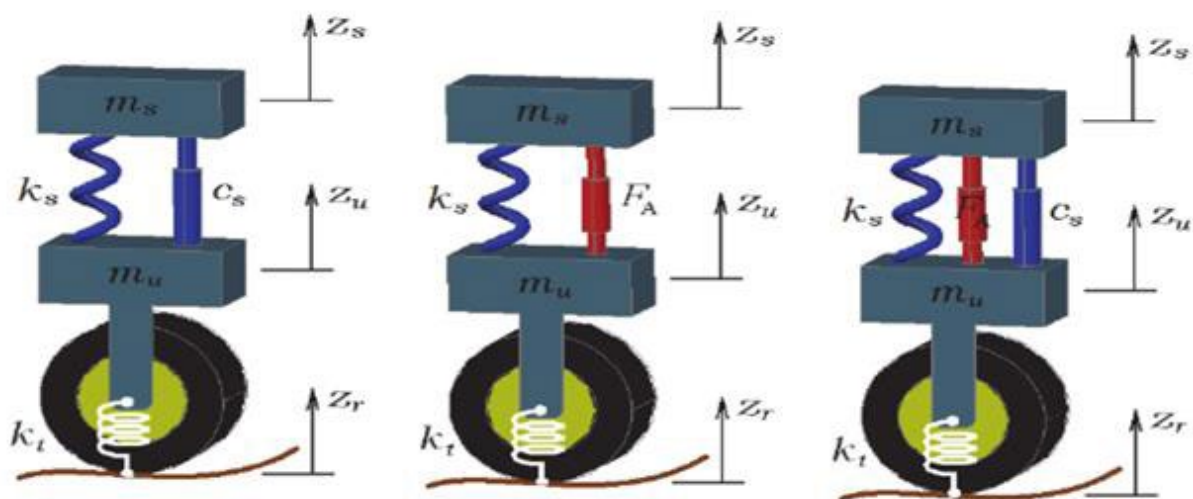
Le système de suspension semi active (Figure I.9.b) est similaire au système passif tant que tous les éléments (ressort et amortisseur) génèrent respectivement leur propre force, toutes fois on considère que le coefficient d'amortissement peut être changé instantanément.

L'amortisseur semi actif est un organe qui fournit instantanément une force contrôlable (modulable) dont, la variation et l'intensité dépendent du type de la suspension semi-active désirée.

Le choix de ce système est motivé par le désir d'améliorer partiellement les performances des suspensions passives mais avec un minimum de matériel, l'inconvénient dans ce type de suspension est le coût qu'il faut payer ainsi que les désagréments causés par l'usure et l'obligation et à la nécessité de changer notre amortisseur dont la durée de vie est écourtée. L'amortisseur semi actif est représenté par le même symbole qu'un visqueux, mais avec une flèche qui indique que la force d'amortissement produite est variable.

I.9.3. Suspension active

En raison des limitations des systèmes de suspensions passive et semi active mentionnés dans les sections précédentes, une suspension active peut être employée.



(a) : Suspension passive (b) : Suspension semi-active (c) : Suspension active

Figure I.9: Types de suspension d'un véhicule

La suspension active (Figure I.9.c) est caractérisée par le besoin de source extérieure d'énergie. Cette énergie permet d'activer le système de contrôle qui contrôlera sans interruption la force produite par le système de suspension. Très souvent, le système de contrôle réagit aux paramètres de véhicule (des vitesses et des déplacements). Ces systèmes de suspension active sont en fait des systèmes dans lesquels les ressorts et les amortisseurs sont remplacés partiellement ou totalement par des actionneurs. La force développée par ces derniers est produite en conformité et en concordance bien sûr, avec une loi de commande qui

utilise les données des différents capteurs attachés au véhicule. Ces capteurs peuvent comporter des accéléromètres, des capteurs de déplacement qui peuvent renseigner par exemple sur la déflexion de la suspension, des gyroscopes, ...etc., [12].

I.10. Modélisation de la suspension

La modélisation est une traduction d'une observation pour mieux comprendre le système dans le but de lui appliquer les outils, les techniques et les théories mathématiques, puis généralement, en sens inverse, la traduction des résultats mathématiques obtenus en prédictions ou opérations dans le monde réel.

Le choix d'un modèle de suspension de véhicule dépend des mouvements auxquels on s'intéresse (le déplacement vertical, latéral, longitudinal, etc.) et les différents éléments constituant le système de suspension du véhicule [7].

La modélisation du profil de la route est importante pour la simulation de la suspension d'un véhicule car il est la principale source de perturbation. Ces perturbations issues de la route sont classées en deux types : perturbation déterministe et autre aléatoire. Les perturbations déterminées comprennent les ondes sinusoïdales, les ondes carrées, les ondulations, les ondes triangulaires, etc. qui peuvent être décrites par une formule mathématique. Cependant la perturbation aléatoire est beaucoup plus complexe à représenter [7].

I.10.1. Modèle d'un quart de véhicule ou mono roue

Le modèle un quart de voiture a été le modèle le plus utilisé dans l'étude et la mise au point des algorithmes de commandes pour un système de suspension intelligent. Bien que le modèle soit très simple et ne considère que les mouvements de vibrations verticales de la masse suspendue et celle non suspendue, il s'avère très utile dans le développement initial des différentes commandes. Celui-ci est représenté dans la figure (I.10) et se compose d'une masse suspendue qui repose, par l'intermédiaire de la suspension, sur autre masse non-suspendue qui repose-elle même sur le sol par l'intermédiaire du pneumatique, d'un ressort, d'un amortisseur et d'un actionneur inséré entre ces deux masses. Ce modèle peut représenter simultanément la suspension passive [13].

La suspension est active si l'actionneur peut générer des forces de commande actives, tandis que la suspension est semi-active si l'actionneur ne peut fournir que des amortissements. À travers des amortisseurs contrôlés [13].

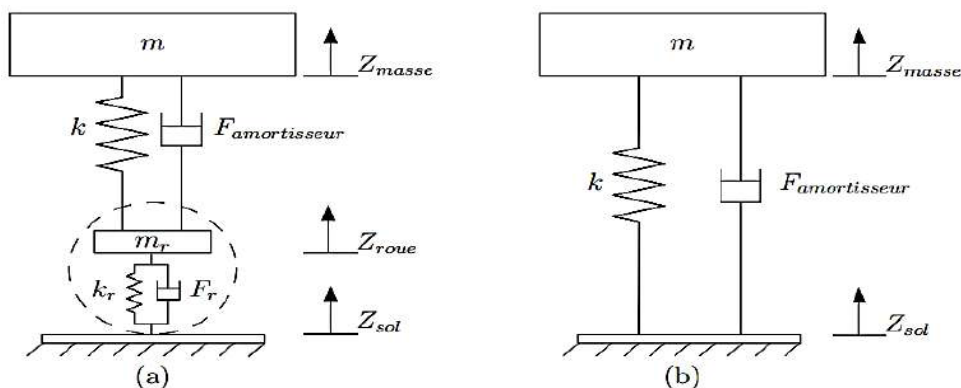


Figure I.10: Modèle de suspension ((a) : quart de véhicule général, (b) : modèle simplifié)

Les équations régissant du modèle quart de voiture peuvent être donnés comme :

$$m\ddot{z}_{caisse} = k(z_{roue}) + F_{amortisseur} \quad (I.1)$$

Avec :

m et m_r : est respectivement la masse suspendue (caisse) et celle non suspendue (roue).

\ddot{z}_{caisse} : l'accélération du châssis.

z_{roue} : le déplacement de la roue.

K : la constante de raideur du ressort de la suspension.

K_r : la constante de raideur équivalente du pneumatique.

F_r : est la force d'amortissement équivalente du pneu.

Z_{sol} : profil vertical de la route.

Dans le cas du modèle quart de véhicule simplifié, l'équation de la suspension se résume à l'équation (I.2).

$$m\ddot{z}_{caisse} = k(z_{roue}) - F_{amortisseur} + (z_{sol} - z_{roue}) + F_r \quad (I.2)$$

Dans ce chapitre, ont considéré la suspension active de véhicule non linéaire avec deux degrés de liberté. Une hydraulique quarte de suspension active de système de véhicule est représentée sur la figure (I.11). Les masses de la carrosserie du véhicule et la roue sont respectivement des parties désignées de la manière m_c (masse suspendu) et m_r (masse non suspendu). Le déplacement respectivement exprimés en z_c et z_r , et x_p désigne la perturbation due à un profil de terrain. Le pneu fonction est représenté par un ressort (k_p) et la masse (m). La suspension passive est simulée par un amortisseur (D) et le ressort (k_p). La variable $u(t)$ est constituée par l'actionneur de force.

De la figure (I.11) et de la loi de Newton, nous pouvons obtenir les équations dynamiques comme suit [10] :

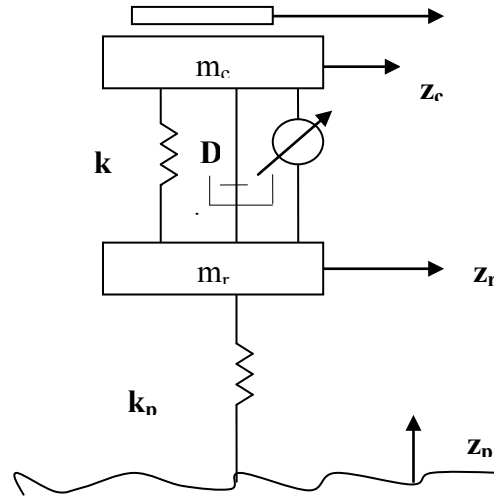


Figure I.11 : Modèle quart de véhicule de deux degré de liberté

$$\begin{cases} m_c \ddot{z}_c = -Dc_1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) - k(c_2(z_c - z_r) + c_3(z_c - z_r)^3) + u \\ m_r \ddot{z}_r = Dc_1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) + k(c_2(z_c - z_r) + c_3(z_c - z_r)^3) + k_p(z_p - z_r) - u \end{cases} \quad (I.3)$$

Où c_1, c_2, c_3 sont des constantes positives (tableau I.1)

Coefficients	m_c (kg)	m_r (kg)	k (N/m)	K_p (N/m)	D (N/m)
Valeurs	229	59	16812	190000	1000
Coefficients	c_1	c_2	c_3		
Valeurs	1	1	6		

Tableau I.1: Paramètres du modèle quart de véhicule [14]

$$x(t) = [z_c(t), z_r(t), \dot{z}_c(t), \dot{z}_r(t)]^T$$

$$\dot{x}(t) = [\dot{z}_c(t), \dot{z}_r(t), \ddot{z}_c(t), \ddot{z}_r(t)]^T$$

On peut réécrire (I.3) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \ddot{z}_c = \frac{1}{m_c} [-Dc_1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) - k(c_2(z_c - z_r) + c_3(z_c - z_r)^3) + u] \\ \ddot{z}_r = \frac{1}{m_r} [Dc_1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) + k(c_2(z_c - z_r) + c_3(z_c - z_r)^3) + k_p(z_p - z_r) - u] \end{cases} \quad (I.4)$$

Avec :

$$z_c(t) = x_1 \text{ et } z_r(t) = x_2, \dot{z}_c(t) = x_3, \dot{z}_r(t) = x_4$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{m_c} [Dc_1(x_3 - x_4) - k(c_2(x_1 - x_2) + c_3(x_1 - x_2)^3) + u] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_r} [Dc_1(x_3 - x_4) + k(c_2(x_1 - x_2) + c_3(x_1 - x_2)^3) + k_p(x_p - x_2) - u] \end{cases} \quad (I.5)$$

I.10.2. Modèle d'un demi-véhicule

Les modèles demi-véhicule sont utilisés pour prendre en compte, en plus des mouvements verticaux, les mouvements de roulis et de tangage de la caisse et de l'essieu [7,13].

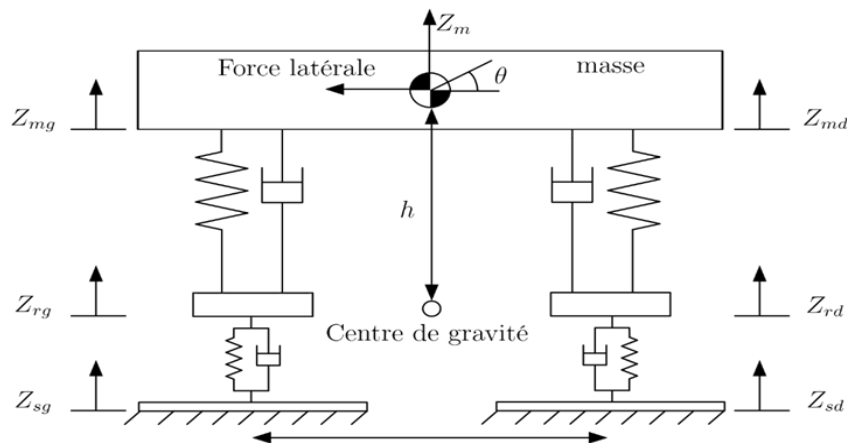


Figure I.12 : Modèle de suspension un demi-véhicule latéral à 4 degrés de liberté [13].

Deux cas de figures existent. Le premier cas est le modèle de demi-véhicule latéral, ce modèle représente une vue en coupe de la suspension avant ou arrière. Il repose sur l'hypothèse qu'un véhicule normal subit des perturbations semblables du côté gauche et du côté droit. Il est utilisé pour étudier les performances de barres anti-roulis. Mathématiquement, c'est un modèle à 4 degrés de liberté. Le second cas est le modèle de demi-véhicule longitudinal représentant une vue de côté d'un véhicule. Contrairement au modèle latéral, le véhicule n'est pas symétrique et les suspensions à l'avant et à l'arrière sont indépendantes. Ce modèle sert à étudier les phénomènes de tangage du véhicule. Ainsi, en plus des forces verticales exercées sur les masses, les équations du mouvement feront

apparaître les moments de perturbation autour des axes de rotations ainsi que leurs inerties. La figure I.12 schématise le modèle [13].

I.10.3. Modèle d'un véhicule complet ou 3D

Différents modèles peuvent être développés pour simuler le comportement de l'ensemble des suspensions du véhicule selon la complexité et le réalisme souhaités. Généralement, pour simplifier l'étude des suspensions, seuls les débattements verticaux des suspensions sont pris en compte et pas les débattements latéraux.

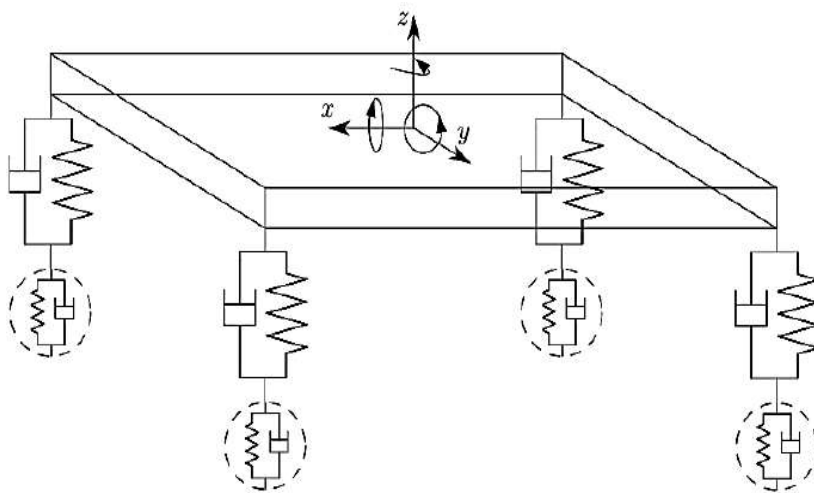


Figure I.13 : Modèle d'un véhicule complet.

Le modèle complet à 7ddl (Figure I.13), est le plus simple, Seuls le mouvement vertical, le roulis et le tangage sont pris en compte car ils engendrent directement un débattement vertical des suspensions. Nous considérons dans notre cas, ces trois mouvements de la caisse ainsi que le déplacement vertical de chacune des quatre roues. Ce modèle peut être complété en tenant compte des 3 déplacements (vertical, latéral et longitudinal) et des 3 rotations (roulis, tangage et lacet possible pour chaque élément. De nouvelles entrées sont alors à considérer notamment l'angle du volant, position de la pédale d'accélération et la pression sur la pédale de frein. Il existe aussi des modèles plus réalistes des suspensions qui représentent les différents bras d'attache d'une suspension et l'inclinaison des amortisseurs et des ressorts qui diffèrent selon l'avant ou l'arrière du véhicule. De plus, on peut aussi compléter un modèle par l'ajout de la suspension du moteur et de celle des sièges des passagers. Cependant ces modèles deviennent rapidement très complexes à utiliser, à cause des non linéarités, des couplages entre les différents et de la taille des systèmes étudiés [7,13].

I.11. Architecture des suspensions courantes

Dans cette partie nous présentons un inventaire des architectures de suspension les plus utilisées. Il existe plusieurs types de systèmes de suspensions. Ils se différencient suivant qu'ils se situent sur les trains avant ou arrière du véhicule. Dans les deux cas on peut diviser l'ensemble de ces systèmes en deux familles : les suspensions à essieu rigide et celles à essieu indépendant. Généralement, le train avant est équipé de suspensions indépendantes tandis que l'essieu rigide est utilisé sur les roues arrière. En ce qui concerne le train avant, trois configurations sont aujourd'hui répandues [12] :

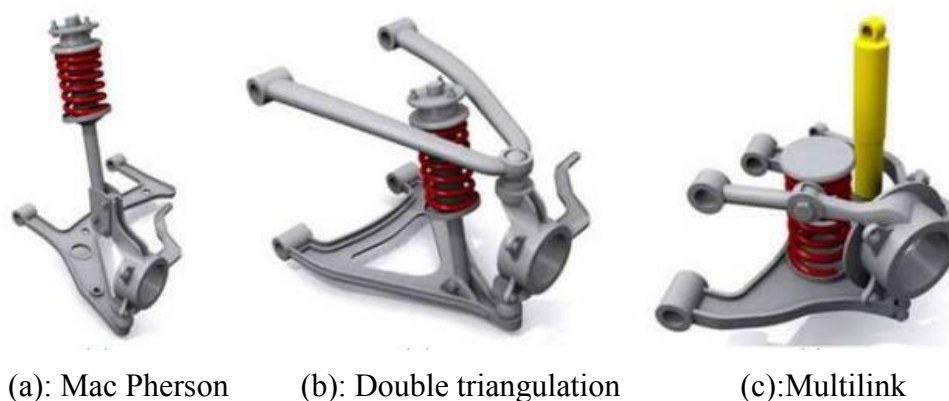


Figure I.14 : Différentes architectures des suspensions des trains avant les plus utilisées sur les véhicules de nos jours.

I.11.1. Le Mac Pherson

C'est la suspension la plus utilisée en automobile (Figure I.14.a). Le combiné ressort-amortisseur est ici un élément à part entière du train avant puisqu'il assure la liaison entre le moyeu et la caisse, à même titre que le triangle inférieur (liaison rotule au niveau du moyeu et pivot avec la caisse). Dans cette situation il faut alors être vigilant quant au dimensionnement du combiné car il doit subir des efforts importants [12].

I.12.2. Le double triangulation

Cette architecture (Figure I.14.b) est plutôt utilisée sur les véhicules à tendance sportive ou haut de gamme car plus coûteux, mais aussi plus efficace quant à la conservation de la géométrie initiale du train (parallélogramme déformable). Dans cette situation, le combiné ressort amortisseur n'a plus à assurer à lui seul la rigidité et la robustesse du train puisque c'est le rôle des deux triangles [12].

I.11.3. Lemulti-Link

C'est la configuration la plus récente (Figure I.14.c), elle est utilisée sur certains modèles de voitures de luxe. On retrouve toujours deux triangles mais la partie supérieure est composée de plusieurs parties articulées afin d'augmenter les possibilités de réglages du train pour, d'après les constructeurs, optimiser la tenue de route. On remarque également que dans ce cas l'amortisseur et le ressort forment deux pièces distinctes contrairement aux modèles précédents [12]. Pour le train arrière de multiples configurations existent du fait des différents modes de transmission (traction, propulsion, 4x4), cependant certains sont plus couramment utilisés, en particulier [13] :

- **L'essieu de torsion** (Figure I.15.a), il fait partie de la classe des essieux à roues dépendantes. En effet les roues sont reliées par une barre qui admet une certaine flexibilité. Une barre rigide appelée barre *Panhard* qui fait la liaison entre une extrémité de l'essieu et la carrosserie sert à maintenir la caisse latéralement au-dessus de l'essieu et limite ainsi ses mouvements horizontaux. Cette configuration est très populaire pour les véhicules à traction avant car c'est une solution simple, robuste et peu coûteuse [13].
- **Le train multi bras** (Figure I.15.b), il veille à une répartition équilibrée de la charge. L'architecture complexe du guide d'essieu garantit un appui optimal à la carrosserie et une direction précise qui renforce la stabilité du véhicule.

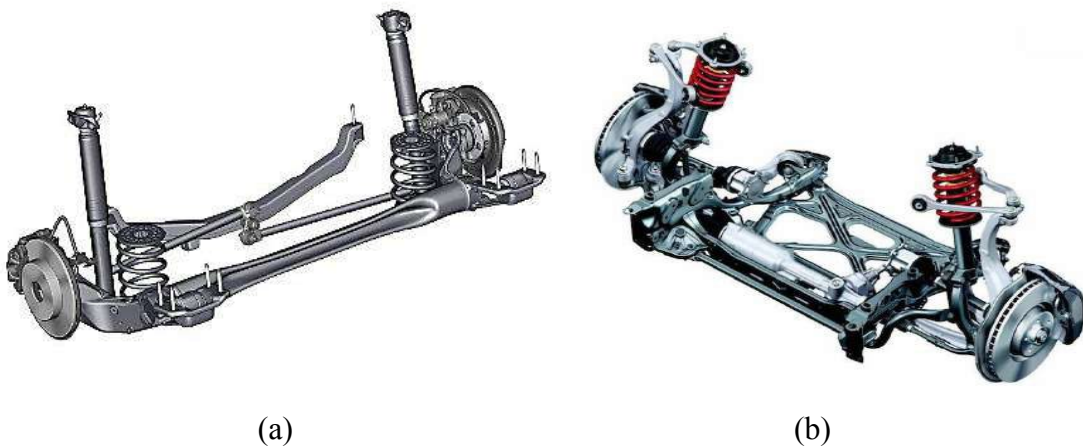


Figure I.15: Architectures de suspension des trains arrière

I.12. Comparaison des performances des trois types de suspension

Type de système de suspension	suspension passive	suspension semi-active	suspension active
L'élément d'amortissement	Amortisseur ordinaire	Amortisseur ajustable	Un système hydraulique/servo-moteur
L'action principale	Coefficient d'amortissement fixe.	Amortissement réglable instantanément	Force entre châssis/roue réglable
La méthode de control	Rien	Automatique Electronique Hydraulique	Electronique Magnétique Hydraulique
La bande passante	Inconnu	Plus de 20Hz	Moins de 15Hz
La consommation d'énergie	Zéro	Très petite	Grande
Caractéristique de la dynamique verticale	Non	Moyenne	Bon
Caractéristique de la dynamique latérale	Non	Moyenne	Bon
Les couts	Plus bas	Moyenne	Plus haut

Tableau I.2: Les performances des trois types de suspension

I.13. Validation du modèle de la suspension passive

Dans la commande en boucle ouverte aucune rétroaction n'est nécessaire et même si une loi de commande est appliquée a priori, aucune connaissance des variables d'état n'est nécessaire. Cela veut dire que la suspension à base d'amortisseur magnéto-rhéologique peut être considérée comme un élément passif dans lequel les propriétés dissipatives peuvent varier d'une valeur à une autre. Dans quelques cas les différents niveaux d'amortissement sont choisis par l'utilisateur. C'est le cas par exemple des suspensions à base d'amortisseur magnéto-rhéologique et en fonction des conditions d'adhérence et de l'environnement (circuit sécurisé ou route publique), le contrôleur propose au conducteur de sélectionner un des programmes de conduite correspondant chacun à une valeur de courant dans l'amortisseur magnéto-rhéologique par exemple : conduite en sol glissant, conduite normale, sportive ou compétition.

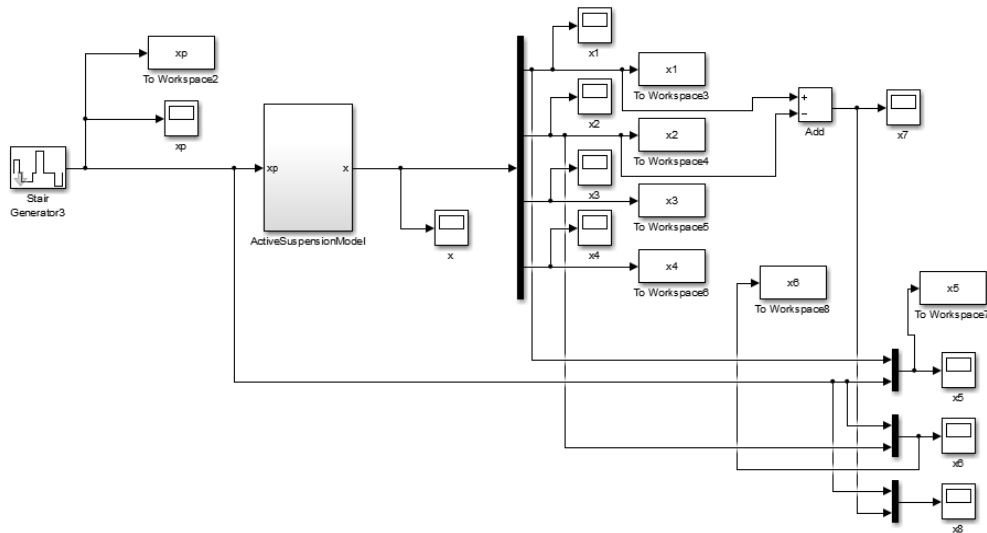


Figure I.16 : Modèle de suspension passive sous Matlab/Simulink

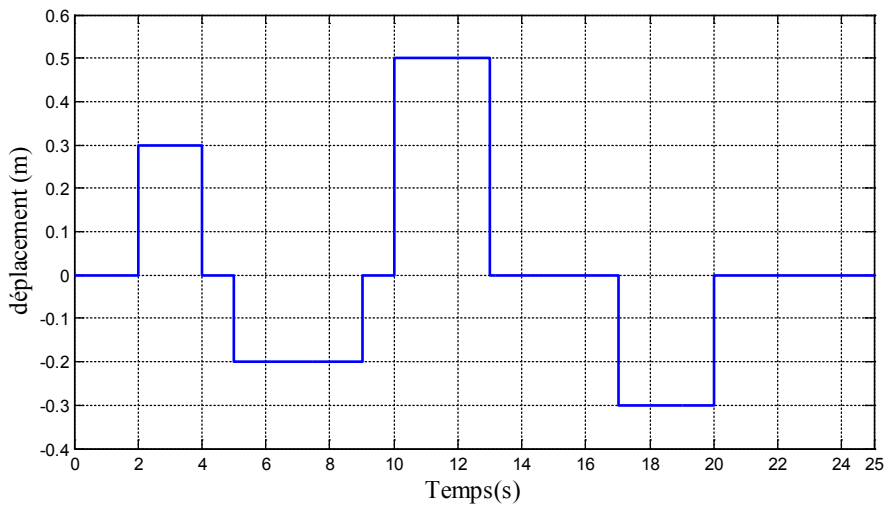


Figure I.17: Perturbation de la route.

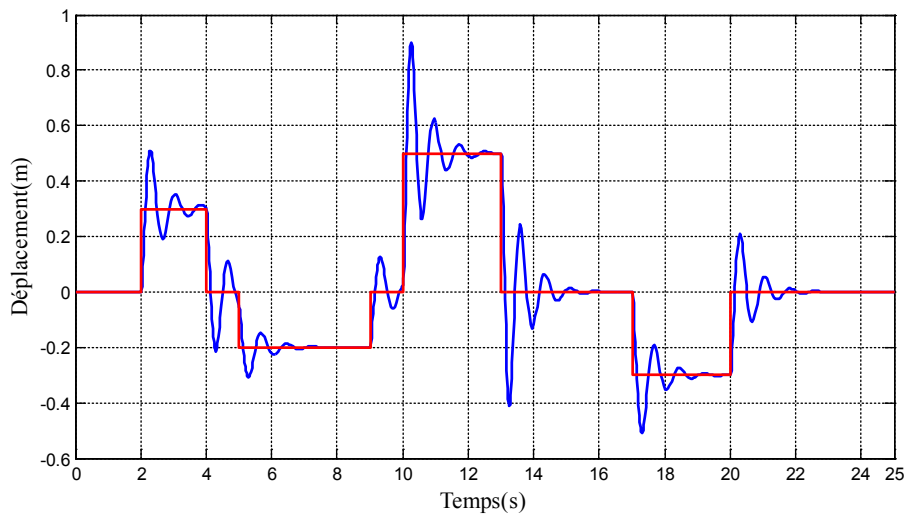
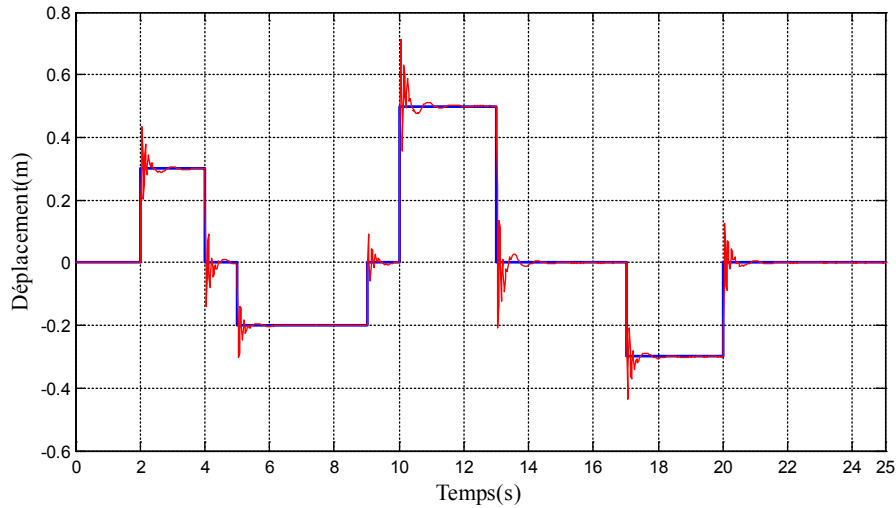


Figure I.18 : Déplacement vertical du châssis (x_1).

Figure I.19 : Déplacement vertical de la roue (x_2)

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la suspension des véhicules. Nous avons commencé par un aperçu sur la suspension, par la suite on a cité les différents mouvements et les éléments d'un véhicule. En fin, nous avons introduit les performances, les composantes, l'influence, les différents types, la modélisation l'architecture de la suspension et la conception du système sous Matlab/Simulink en boucle ouverte avec les résultats obtenus.

II.1. Introduction

Les commandes classiques comme PID permettent de commander des systèmes linéaires et il est plus efficace parce qu'il y a des paramètres constants. Néanmoins, pour les systèmes non linéaires avec des paramètres variables et des variations temporelles, il faut chercher et appliquer des algorithmes de commande assurant la robustesse du système malgré les perturbations et les variations.

La commande à structure variable (CSV) est une commande non linéaire. Le contrôle par mode glissant, qui est une classe de commande à structure variable, attire l'attention de plusieurs chercheurs dans le domaine de contrôle des machines électriques. L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes [14].

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts, la théorie et les différents outils de base de la commande par mode glissant.

II.2. Commande PID

Les contrôleurs PID sont largement utilisés et conviennent aux modèles de systèmes dits linéaire. Par conséquent, si la modélisation du système n'est pas très proche de la linéarité, cela affectera les performances de ce type de contrôleur.

La conception de ce type de contrôleur se fait à travers des expérimentations dans le domaine fréquentiel, notamment lorsque l'on ne dispose pas d'un modèle mathématique du système, Si le système est représenté par la fonction de transfert $G(j\omega)$ dans le domaine fréquentiel, le système est linéaire et la fonction de transfert est le résultat d'une certaine linéarisation du modèle du système

La réponse réelle du système contrôlé par PID dépend fortement de la précision du modèle linéaire dynamique du système. Par conséquent, le modèle doit représenter le comportement dynamique actuel du système [15].

II.2.1. Description des régulateurs PID

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $y^*(t)$.

2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur [15].

II.2.2. Le régulateur PID

Le régulateur PID classique relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écart $e(t)$. Sa description temporelle est la suivante :

$$U(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(s) ds + k_d \dot{e}(t) \quad (\text{II.1})$$

Avec l'écart défini comme suit :

$$e(t) = y^*(t) - y(t) \quad (\text{II.2})$$

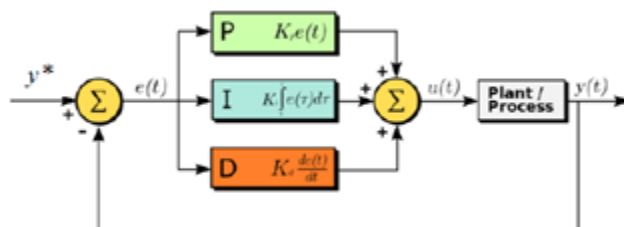


Figure II.1 : Structure de retour linéaire de la forme présent-passé-futur.

Sa fonction de transfert s'écrit :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (\text{II.3})$$

Le concepteur de l'asservissement rencontre deux types de situations auxquelles, il doit faire face :

- Assurer une réponse acceptable pour des signaux de consigne définis en fonction du temps (cycle de température pour un traitement thermique).
- Fournir des caractéristiques fréquentielles (gain, déphasage) demandées dans une bande de fréquences (par exemple : asservissement du mouvement d'un haut-parleur dans un système haute-fidélité).

On impose les qualités de l'asservissement en termes de spécifications temporelles dans le premier cas, en spécifications fréquentielles dans le second cas. Le but de la correction est de doter l'asservissement des qualités attendues, par le calcul et l'implantation du correcteur nécessaire. Les opérateurs essentiels du correcteur sont réalisables à partir d'amplificateurs à courant continu et d'éléments résistances/capacités. La réalisation numérique peut se

transposer aisément à partir d'un schéma analogique, en conservant la même organisation fonctionnelle et en associant un intégrateur numérique à chaque intégrateur électronique [15].

II.2.3. Aspects fonctionnels du régulateur PID

La mise en œuvre d'une boucle de régulation PID a deux facteurs principaux :

- Le réglage du régulateur PID, pour lequel la connaissance d'un modèle dynamique du procédé d'une part et les performances désirées d'autre part déterminent le choix de la méthode de synthèse.
- L'implantation du régulateur dans une version analogique ou numérique et dans une configuration série, parallèle ou mixte.

II.3. La commande par mode glissant

La Commande par mode glissant, (Sliding Mode Control ; SMC) apparue en union soviétique pendant les années 60, qui provient de la théorie des systèmes à structure variable (SSV), permet d'accomplir cette tâche. Ce type de contrôle peut assurer la stabilité même lorsque la puissance ou la charge change considérablement, la réponse dynamique est bonne et la mise en œuvre est simple [16].

II.3.1. Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la technique de commande par mode glissant se confiné à deux points essentiels :

- Synthétiser une surface $S(x, t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité .
- Déterminer une loi de commande $u(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface [16].

II.3.2. Différentes structures du contrôle par mode de glissement

Dans la littérature on trouve trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation est au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état, la dernière est une structure de régulation avec ajout de la commande équivalente [17].

II.3.2.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné par la figure (II.2). Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée.

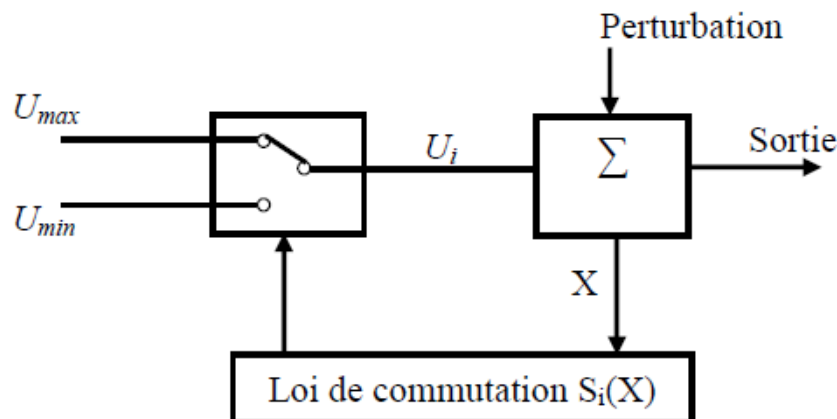


Figure II.2: Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans la majorité d'application aux variateurs de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas [17].

II.3.2.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

À partir le schéma d'une telle structure sur la figure (II.3). D'après les études réalisées, c'est la structure qui nécessite au niveau de la demande de la commande. il a été mis en œuvre dans la commande de moteur à aimants permanents et à courant continu, ainsi que dans la commande de machine à induction.

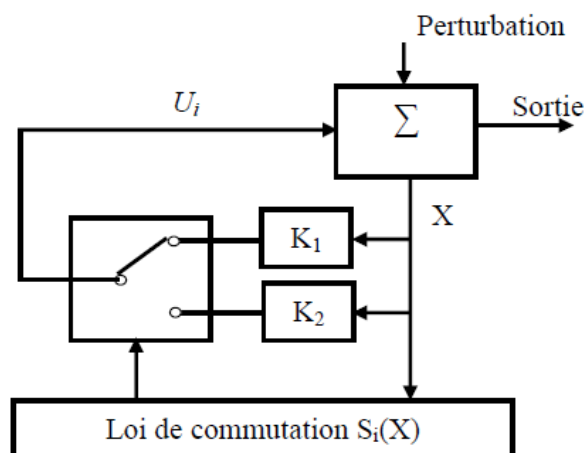


Figure II.3: Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

D'autre part il est basé sur la commande de la réponse de l'état, ou l'ajustement de la dynamique du système est dû au bénéfice du réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on a créé une commutation au niveau de la dynamique du système.

II.3.2.3. Structure de régulation avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (II.3), présente un réel avantage. Elle permet de pré-conditionner l'état futur du système par la commande équivalente qui n'est rien d'autre que volonté du système d'être en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait l'expression de cette commande équivalente.

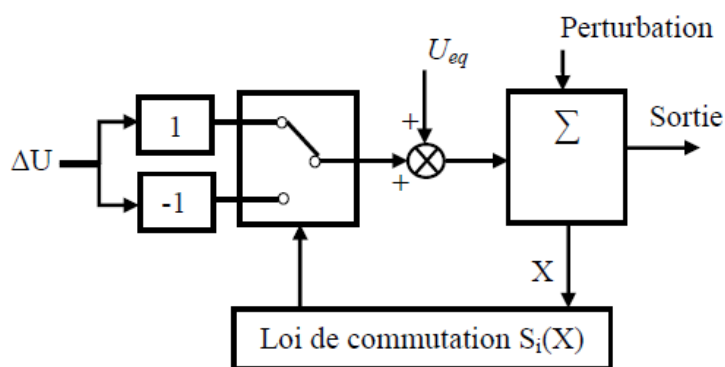


Figure II.4 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

II.3.3. Principe de la commande par mode glissant

La technique des modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. Parmi les propriétés des modes glissants [18].

- La trajectoire d'état du système en mode de glissement appartient à une surface de dimension inférieure à celle de l'espace d'état, par conséquent l'ordre des équations différentielles régissant le fonctionnement du système en mode de glissement est réduit.
- La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.
- La dynamique du système en mode de glissement est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement.

La dynamique de la commande par mode glissant est divisée en trois parties :

- Le mode non glissant ou mode d'accès, ou encore mode de convergence : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x, \dot{x}) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode glissant : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement.
- Le mode du régime permanent : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par les performances de la commande la figure (II.5) affiche les différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase [19].

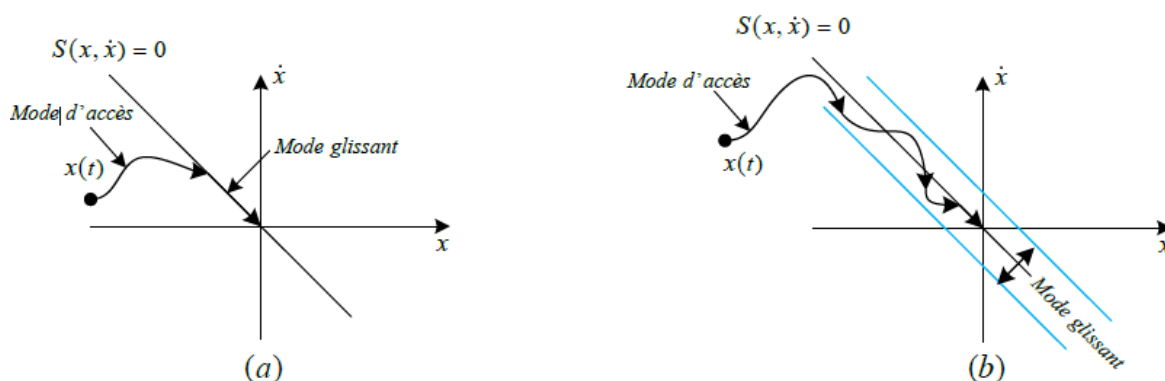


Figure II.5 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase ((a) : Glissement idéal, (b) : Glissement réel)

II.3.4. Système à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure. Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est conduite vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est forcée à rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée

surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit et appelé mouvement de glissement [14].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

1. **Le mode de convergence (MC) :** C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
2. **Le mode de glissement (MG) :** C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y) = 0$
3. **Le mode du régime permanent (MRP) :** Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [20].

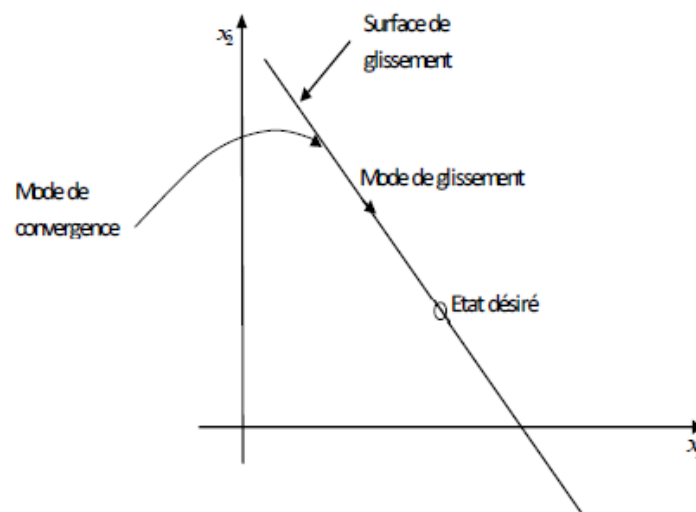


Figure II.6 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

II.3.5. Conception de la commande par mode glissant

La conception par mode glissant s'effectue généralement selon trois étapes nécessaire lié l'une aux d'autre :

1. Choix des surfaces de glissement.
2. Principe d'invariance.
3. Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.

4. Détermination de la loi de commande.

II.3.5.1. Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne à nombre et des fonctions nécessaires de ces surfaces mais également à leur forme. J.J Stoline a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne \dot{x} . Cette fonction est donnée comme suit :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + K_s \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{II.4})$$

Avec : $e(x) = x - \dot{x}$: représente l'écart entre la variable x à régler et sa référence \dot{x} .

K_s : est une constante positive.

r : est l'ordre du système.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface $S(x)$ à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)$. Pour un choix convenable des gains du régulateur, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence [21].

II.3.5.2. Principe d'invariance

Cette propriété nécessite toutefois que certaines hypothèses appelées (matching conditions) soient vérifiées par les perturbations.

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A).x(t) + B u(t) + f(t) \quad (\text{II.5})$$

Où : ΔA et $f(t)$ sont respectivement le terme d'erreurs de modélisation et une perturbation externe.

ΔA et $f(t)$ vérifient l'hypothèse des matching conditions s'il existe $\Delta \tilde{A} \in R^{n \times m}$ et $\Delta \tilde{f} \in R^{n \times m}$ telle que :

$$\Delta A = B.\Delta \tilde{A} \text{ et } \Delta f = B.\Delta \tilde{f}$$

La signification physique de cette hypothèse est que l'on considère des incertitudes de modélisation ou une perturbation attaquant le système par la matrice d'entrée [22].

II.3.5.3. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et de rester indépendamment de la perturbation [18]. On présente deux types de conditions qui sont :

➤ **Fonction direct de commutation** : Elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$S(x).\dot{S}(x)<0 \quad (\text{II.6})$$

➤ **Fonction de LYAPUNOV** : Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire strictement positive) pour les variables d'état du système et ensuite on formule la loi de commande qui fera décroître cette fonction. La fonction de Lyapunov est définie par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{II.7})$$

Pour décroître la fonction du Lyapunov, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative ; $\dot{V}(x)<0$. Par conséquent, le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement diminue tout le temps ce qui va contraindre la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière [21].

II.3.5.4. Calcul de la commande

La théorie VSC est basée sur l'idée que la topologie du système est modifiée intentionnellement afin que la réponse du système suive une trajectoire prédéfinie. De plus, il existe différentes manières de choisir les paramètres de chaque structure et de définir la logique de commutation. Dans la littérature il y a 3 types de structure très répandues, la commande par contre - réaction linéaire a gain commutés, la commande par relais, et la commande équivalut. Les deux dernières approches, sont les préférées dans la commande des machines électriques parce qu'elles sont plus appropriées.

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, schématisée sur la figure (II.7) [23].

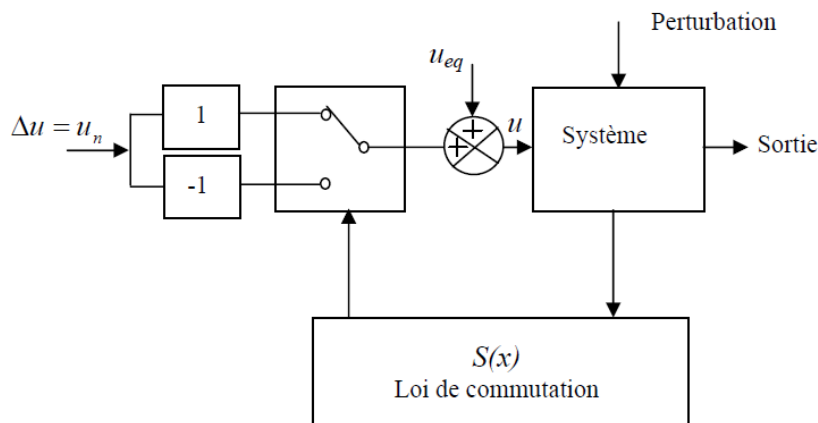


Figure II.7: Schéma fonctionnelle de la commande équivalente.

Une fois, la surface de glissement choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la condition nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre. Tout ceci en maintenant la condition d'existence des modes glissants effective. La structure de contrôleur comprend deux parties, une partie concernant la linéarisation exacte et une autre dite stabilisante. Nous posons donc :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{II.8})$$

Est déterminée à partir de la condition de convergence. Est calculée pour garantir l'attractivité de la variable d'état à contrôler vers la surface de commutation :

$$U_n = -K_u \text{signe}(S) \quad (\text{II.9})$$

Le choix de la constante K_u est **très influent**. Car si la constante K_u est très petite, le temps de réponse est trop long et si elle est trop grande [24].

II.3.5.4.1. La commande équivalente

La commande équivalente est augmentée par un terme appelé action de la commande discontinue u_n , pour satisfaire les conditions d'atteinte de la surface $S(x)$. Dans ces conditions la commande est écrite comme suit :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{II.10})$$

La première étape, est de définir une entrée U_{eq} , de telle façon que la trajectoire d'état reste sur la surface de commutation $S(x) = 0$. La dérivée de la surface $S(x)$ est [25] :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} A(x) + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) \cdot U_{eq} + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) \cdot U_n \quad (\text{II.11})$$

La commande équivalente est déterminée durant la phase de glissement et la phase du régime permanent en identifiant que $S(x) = 0$, et par conséquent $\dot{S}(x) = 0$, et $U_n = 0$. Dans ces conditions la solution de l'équation (II.6) est alors :

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A(x) \quad (\text{II.12})$$

Avec la condition que :

$$\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \neq 0 \quad (\text{II.13})$$

Une fois U_{eq} défini, est substituée dans le système (II.12), pour avoir la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \cdot U_n \quad (\text{II.14})$$

La commande U_{eq} peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que prend la commande u lors des commutations rapides entre $U^+(U_{max})$ et $U^-(U_{min})$ figure (II.7) [26]:

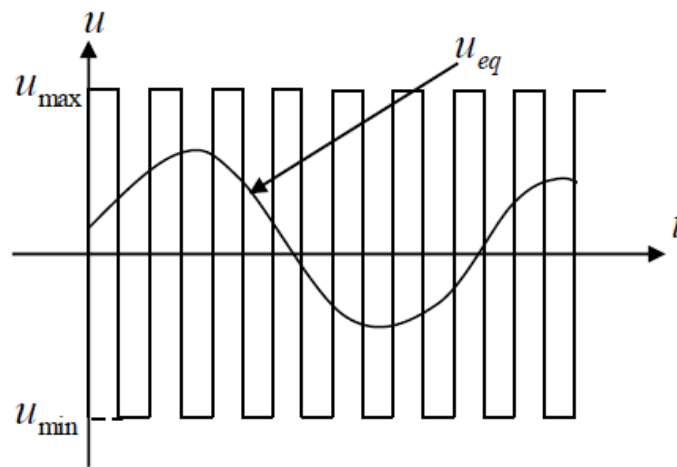


Figure II.8 : Commande équivalente U_{eq}

II.3.5.4.2. La commande discontinue de base

La commande U_n est définie durant le mode de convergence et doit satisfaire la condition $S \cdot \dot{S} < 0$. Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de :

$$S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \quad (\text{II.15})$$

La commande U_n , est donnée par la forme de base qui est celle d'un relais représenté par la fonction « *sign* » figure (II.9) :

$$U_n = K \cdot \text{sign}S(x) \text{ avec } K > 0 \quad (\text{II.16})$$

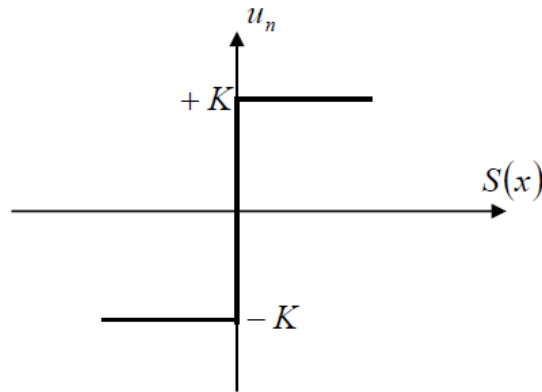


Figure II.9: Fonction « *sign* »

Où, K est le gain de la commande discontinue, le signe de K est choisi opposé au *sign* de la grandeur $\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$, $\text{sign}(\cdot)$ est une fonction mathématique permettant de déterminer le signe de la surface .

Le choix de la constante K est **très influent**. Car si la constante K est très petite, le temps de réponse est trop long et si elle est trop grande, des oscillations de très hautes fréquences appelées phénomène de chattering [27].

II.3.5.5. Le phénomène de chattering

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Evidemment, pour une utilisation pratique, seule une commutation à fréquence finie est possible. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé « chattering ». Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement. C'est le principal inconvénient de cette commande.

L'un des principaux inconvénients du réglage par mode de glissement est le phénomène du chattering à cause de l'utilisation du la terme $\text{sign}(x)$ dans le signal de commutation avec des grandes valeurs du gain K : $U_n = -K_u \text{signe}(S)$ provoque cette phénomène qui peut exciter les haute fréquences et détérioré le système commandé.

En pratique, de telles oscillations sont quelque fois indésirables car elles peuvent dégrader performances du système et même le déstabiliser [24,28].

Ces des techniques qui peut réduire le phénomène de chattring :

1. **Utiliser des commandes à gain décroissant :** définies par $U = -K|S| \text{signe}(S)$ où la commande diminue en amplitude à mesure que l'on s'approche de la surface de glissement. Aussi, pour cette méthode la précision, la robustesse et le temps de réponse sont dégradés.
2. **Les modes glissants d'ordre supérieur :** (higher order sliding en anglais) Cette Méthode récente a été introduite dans les années 80. Elle consiste à introduire de nouvelles dynamiques dans la commande ainsi que le problème de discontinuité dû à l'élément de commutation est déplacé sur les dérivées d'ordre supérieur de la commande [29].
3. **l'intelligence computationnelle :** Trois techniques principales de l'intelligence computationnelle ont été combinées avec la commande par mode glissant :
 - La logique floue.
 - Les réseaux de neurones.

Les algorithmes évolutionnaires en particulier les algorithmes génétiques [30].

4. **D'autres méthodes sont proposées pour limiter ce phénomène :** Par exemple a utilisé pour la commande d'une MAS par régulateurs à mode glissant la commande dite douce à un seul seuil, elle est donnée par le système (II.15) et représentée sur la figure (II.10) :

$$U_n = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K S(x) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ K \cdot \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Cette fonction est connue aussi par, la fonction saturation « SAT » [30] :

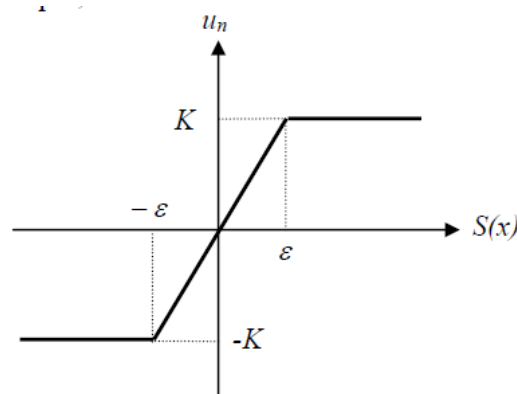


Figure II.10 : Commande un adoucie « SAT »

Où la commande intégrale de U_n il est illustrée dans la figure (II.11) :

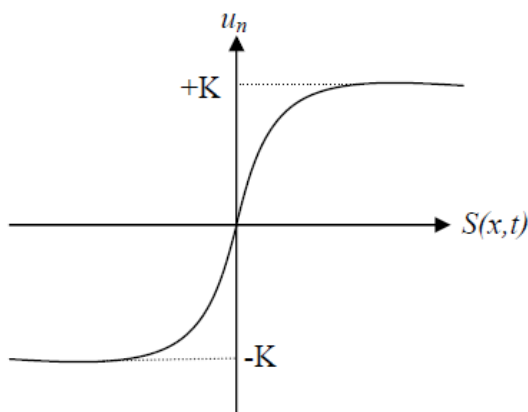


Figure II.11: Commande U_n intégrale.

II.3.6. Domaine d'application du réglage par mode glissant

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables, complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz.

Les entraînements électriques pour des machines-outils ou des robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant.

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que : les processus chimiques et métallurgies, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages cités précédemment [31].

II.3.7. Les avantages de commande par mode glissant

Le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages qui sont :

- ✓ Imprécision et variation de paramètres : problème d'identification.
- ✓ Simplification du modèle dynamique du système : problème de modélisation.
- ✓ Robustesse, rejetant la perturbation.

- ✓ On peut étendre la technique a des surfaces autres que des droites, de dimension quelconques, et a des intersections d'autant de telles surfaces qu'on a des commandes disponibles.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord donné un aperçu sur le PID en suit on donne un rappel sur le mode glissant et présenté la théorique de cette commande et on définit la base et les conceptions nécessaires de la commande a structure variable et ces d'efférents structure, comme le choix de sur face de glissement et la loi de commande excitera, enfin la manière de réduire de phénomène de chatterring qui résultent par la loi de commande (la fonction *sign*) nous donnons plusieurs solution pour éviter ce phénomène dans le chapitre suivant, on s'intéresse à l'application de cette commande sur le modèle de la suspension active .

III.1. Introduction

Le premier but de la suspension active d'automobile est assurer un meilleur confort et soigner les composant du véhicule pour réaliser le but on choisit la commande par mode glissant pour appliquer à ce système parce que y'a plusieurs avantages essentiellement la robustesse.

Dans ce chapitre, Nous présentons les résultats de simulation de la commande SMC appliqué au système de suspension active avec le calcul de la commande, nous avons déjà donné les bases principales et la théorie de calcul de la commande dans le chapitre précédant, on applique aussi le contrôleur PID pour faire une comparaison avec nos résultats obtenus avec l'application de la commande par mode glissant.

III.2. Commande par mode glissant de la suspension active

III.2.1. Construction de la commande

Premièrement on choisit la surface de glissement suivante :

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$e = \Delta x - \Delta x_d = (x_1 - x_2) \quad (\text{III.2})$$

En remplaçant (III.2) dans (III.1) la relation de la surface de glissement devient:

$$S = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \lambda(x_1 - x_2) \quad (\text{III.3})$$

Selon le modèle de la suspension active (I.5), (III.3) devient :

$$S = (x_3 - x_4) + \lambda(x_1 - x_2) \quad (\text{III.4})$$

Alors, on peut déduire \dot{S} comme:

$$\dot{S} = (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + \lambda(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + \lambda(x_3 - x_4) \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{aligned} \dot{S} = & -\frac{1}{m_c} Dc_1(x_3 - x_4) + \frac{1}{m_c} k(c_2(x_1 - x_2) + c_3(x_1 - x_2)^3) - \frac{1}{m_c} u \\ & - \frac{1}{m_r} Dc_1(x_3 - x_4) - \frac{1}{m_r} k(c_2(x_1 - x_2) + c_3(x_1 - x_2)^3) - \frac{1}{m_r} k_p(x_p - x_2) \\ & + \frac{1}{m_r} u + \lambda(x_3 - x_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\lambda - \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_r} \right) Dc_1 \right) (x_3 - x_4) + \left(\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_r} \right) k (c_2 (x_1 - x_2) + c_3 (x_1 - x_2)^3) \\
&\quad - \frac{1}{m_r} k_p (x_P - x_2) + \left(\frac{1}{m_r} - \frac{1}{m_c} \right) u
\end{aligned} \tag{III.6}$$

Pour déterminer la commande équivalente u_{eq} définie dans le chapitre II, il faut résoudre l'équation $\dot{S}=0$, on obtient :

$$\begin{aligned}
u_{eq} = \frac{1}{\left(\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_r} \right)} &\left\{ \left(\lambda - \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_r} \right) Dc_1 \right) (x_3 - x_4) + \left(\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_r} \right) k (c_2 (x_1 - x_2) + c_3 (x_1 - x_2)^3) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{m_r} k_p (x_P - x_2) \right\}
\end{aligned} \tag{III.7}$$

Donc la commande par mode glissant appliquée au système de suspension active est donnée par :

$$\begin{aligned}
U &= u_{eq} + u_d \\
&= u_{eq} - \alpha \text{sign}(S) \\
&= \frac{1}{\left(\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_r} \right)} \left\{ \left(\lambda - \left(\frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_r} \right) Dc_1 \right) (x_3 - x_4) + \left(\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_r} \right) k (c_2 (x_1 - x_2) + c_3 (x_1 - x_2)^3) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{m_r} k_p (x_P - x_2) \right\} - \alpha \text{sign}(S)
\end{aligned} \tag{III.8}$$

III.2.2. Résultat de simulation

Le système de suspension active a été simulé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink (figure III.1), avec l'application des contrôleurs PID et SMC, selon les paramètres du modèle quart de véhicule définies dans le tableau I.1.

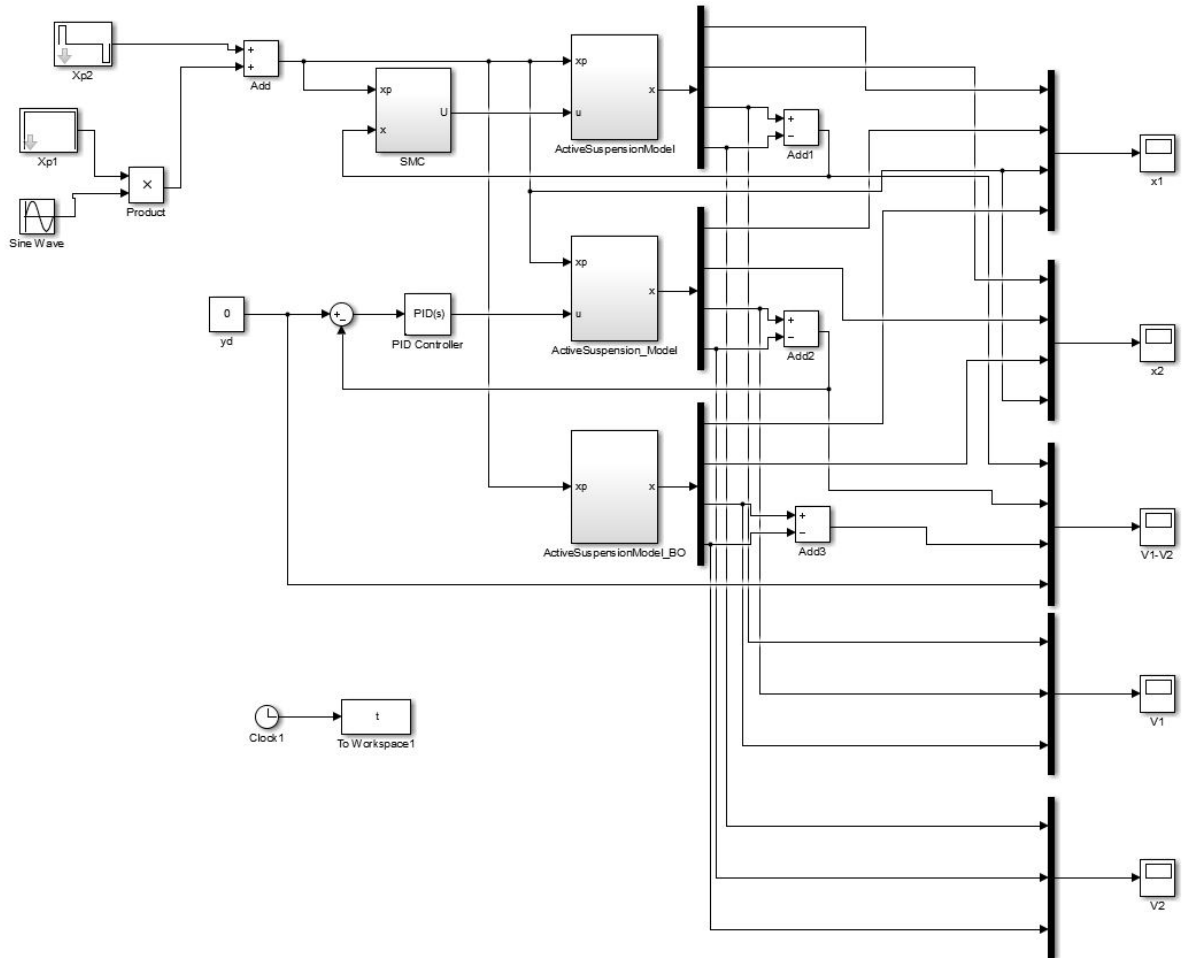


Figure III.1 : Commande de la suspension active (PID et SMC).

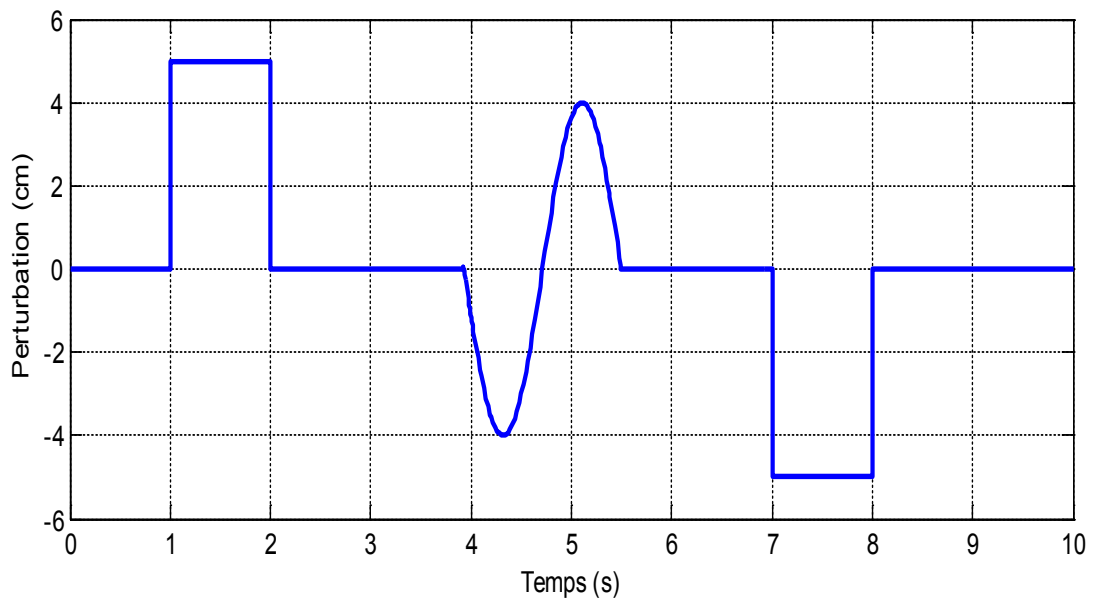


Figure III.2 : Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route)

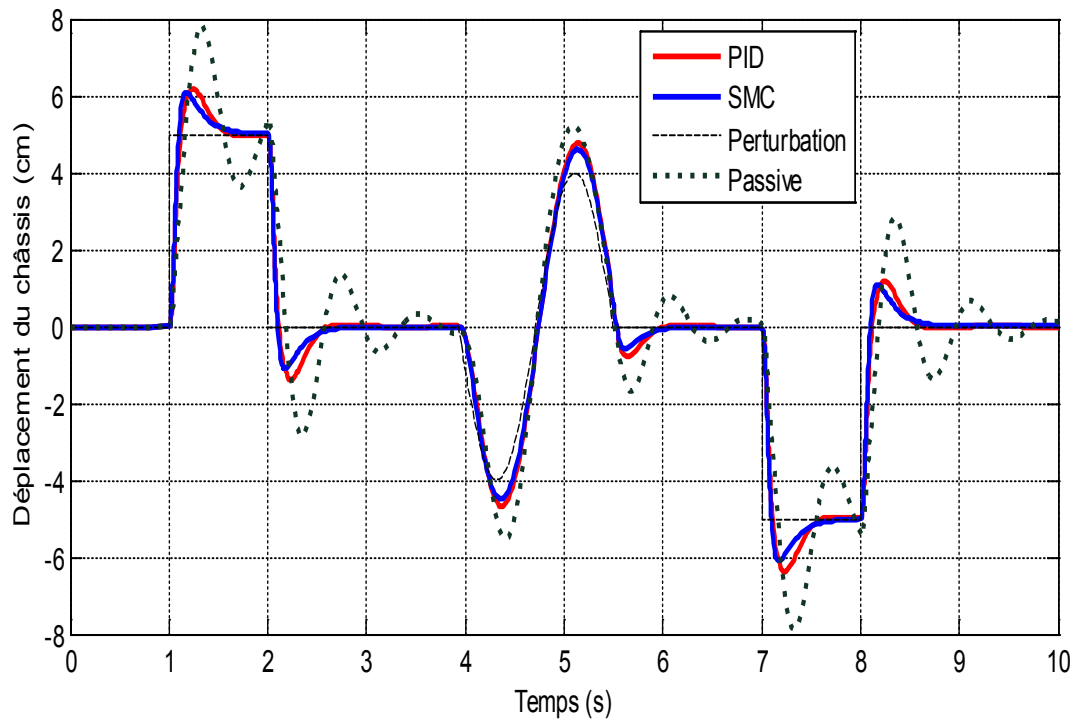


Figure III.3: Déplacement vertical du châssis

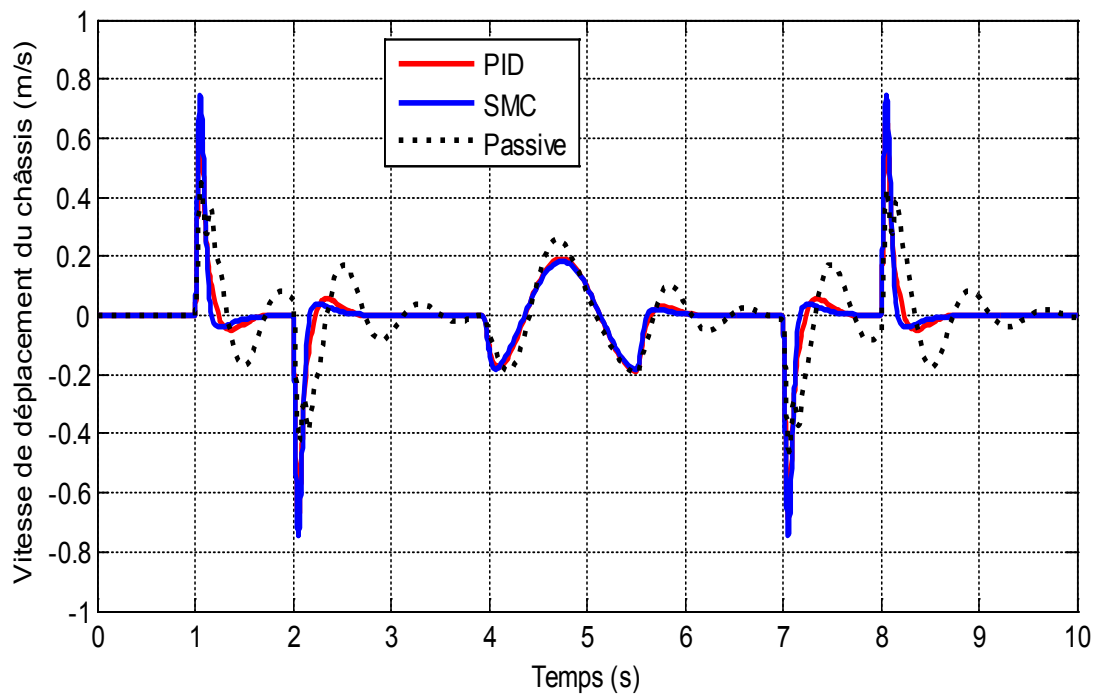


Figure III.4: Vitesse de déplacement vertical du châssis

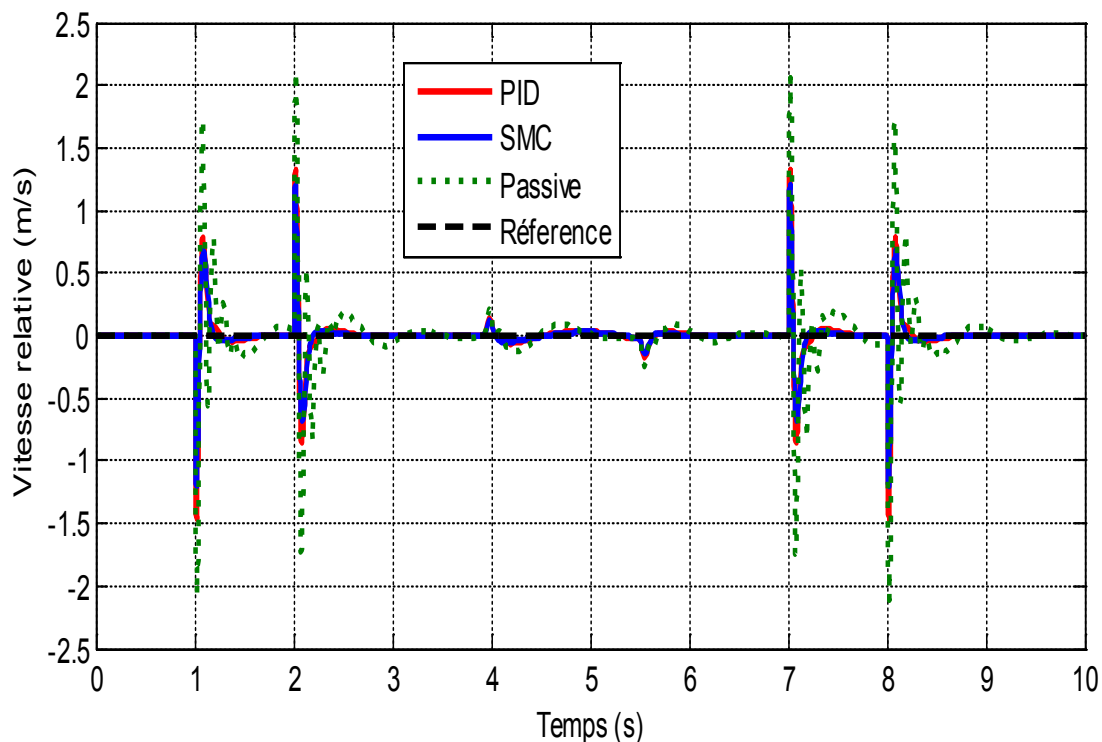


Figure III.5: Vitesse relative

On remarque que la stabilisation rapide avec amplitude en accélération et position de la carrosserie de la voiture, la robustesse de la commande à se stabiliser au système avant la perturbation inconnue est vérifiée, deux contrôleurs conçus avec succès et appliqués au système de suspension et sur la base des résultats et des analyses, nous montrons que PID et SMC ont la capacité de contrôler le système de suspension du véhicule. Tous les contrôleurs conçus avec succès ont été comparés. Sous différents résultats de simulation d'entrée de route dans les figures (III.3 à III.5) montrent que le contrôleur SMC a de meilleures performances par rapport au contrôleur PID dans le contrôle du système de suspension. Ce document a notamment montré que pour améliorer le confort de conduite dans les véhicules, un contrôleur de mode glissant devrait être préféré.

III.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la commande par mode glissant sur la suspension active d'un véhicule automobile cette commande vraiment robuste puisqu'elle improuve des performances meilleures via la loi de commande.

D'abord, nous avons présenté le calcul de la loi de commande. Ensuite, nous appliquons cette commande sur le système de suspension active. Enfin, on obtient les résultats de simulation donc la commande proposées permet de rejeter les perturbations. Finalement, on

conclure que la structure de cette commande est plus performante que celle des résultats du contrôleur PID. Alors, la technique de la commande par mode glissant est efficace.

Conclusion générale

Généralement, les fonctions d'un système de suspension sont d'isoler les occupants ou la cargaison des niveaux sévères de chocs et de vibrations induits par la surface de la route et également de permettre aux roues de maintenir le contact avec la route, assurant la stabilité et le contrôle du véhicule. Le système de suspension du véhicule peut être classé en système de suspension passif, semi-actif et actif en fonction de l'alimentation externe du système. La capacité d'injecter de l'énergie dans le système, ainsi que de la stocker et de la dissiper, différencie les suspensions actives de la suspension passive conventionnelle. De nombreux chercheurs ont proposé diverses stratégies de contrôle pour améliorer le compromis entre le confort de conduite et la tenue de route qui se produit lorsque la suspension passive de la voiture est utilisée. Celles-ci comprenaient la méthode LQR, le contrôle Hinfinité, le contrôle en mode glissant (SMC), le contrôle en mode glissant proportionnel (PISMC)...etc.

Dans ce travail nous avons discuté des performances des systèmes de suspension active sous les techniques SMC et PID. Après la simulation nous avons vu que la commande SMC a une meilleure performance par rapport au contrôleur PID.

Références bibliographique

- [1] B. Bilgic, Master Thesis, Control of Vehicle Suspension Systems using MR Dampers, Istanbul University, Institute of Science, Istanbul, 2007.
- [2] A. Florin, M.R.I.Cozman,P.Liliana, Passive suspension modeling using matlab, quarter car model, input signal step type, New technologies and products in machine manufacturing technologies (2013) 258-263.
- [3] Hongyi Li, Jinjong Yu, Chris Hilton, Honghai Liu, Adaptive Sliding-Mode Control for Nonlinear Active Suspension Vehicle Systems Using T–S Fuzzy Approach, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(8), 2013, 3328-3338.
- [4] W. Sun, H. Gao, O. Kaynak, Adaptive Backstepping Control for Active Suspension Systems with Hard Constraints, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 18(3), 2013, 1072-1079.
- [5] J.J. Rath, M. Defoort, H.R. Karimi, K.C. Veluvolu, Output Feedback Active Suspension Control with Higher Order Terminal Sliding Mode, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(2), 2017, 1392-1403.
- [6] R-J. Lian, Enhanced Adaptive Self-Organizing Fuzzy Sliding-Mode Controller for Active Suspension Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(3), 2013, 958-968.
- [7] Bouraoui, N., Rezai, I., &Saifia, D. E. (2018). *Modélisation et commande H_∞ de suspension de véhicules* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [8] Gosselin-Brisson, S. (2006). *Étude d'un système de contrôle pour suspension automobile*. Université du Québec à Chicoutimi.
- [9] Mohamed, B. (2014). *Contrôleurs non linéaires adaptatifs pour une Suspension active d'un véhicule* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie).
- [10] DJAALAB, H., & HOUIDECHE, R. (2020). *Modélisation et Commande Floue Stabilisante de la Suspension Active de Véhicule* (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [11] Sannier, D. (2001). *Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).

-
- [12] Sleiman, H. (2010). *Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique pour l'automobile* (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [13] BENGATRAN, F., BENSID, M. B., & BECHKA, L. Commande du système de suspension d'un véhicule.
- [14] Aissaoui, A. G., Abid, H., Abid, M., & Tahour, A. (2009). Commande par la logique floue et mode Glissant d'une machine synchrone autopilotée. *RevRoumSciTechn-Électrotechn Énerg*, 52(1), 89-104
- [15] BENBOUZIANE, M. A. *Synthèse de régulateur PID pour les systèmes non linéaires incertains du deuxième ordre* (Doctoral dissertation).
- [16] Cheddadi, F., Boumhidi, I., & Sefriti, S. (2018, November). Comparaison entre la Commande MPPT par mode glissant et la Perturbation et Observation pour les systèmes Photovoltaïques. In *IMAT3E'18 International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering*.
- [17] ZAGHBA, A. (2009). *Synthèse des lois de commande robuste à structure variable pour une machine asynchrone* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [18] V. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. ac-22, no.1, April. 197, pp. 212-222
- [19] ZORIG, A., & GHADBANE, H. E. (2019). *Simulation par PIL de la commande par mode glissant de deux convertisseurs buck et boost entrelacés* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [20] Hung, J. Y., Gao, W., & Hung, J. C. (1993). Variable structure control : A survey. *IEEE transactions on industrial electronics*, 40(1), 2-22.
- [21] Maker, H. (2008). *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs* (Doctoral dissertation, Besançon).
- [22] BENAZIZA, W. (2015). *Commande par modes glissants du suivi de trajectoires pour un robot mobile* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [23] Faqir, A., Betin, F., Alaoui, L. C., Nahid, B., & Pinchon, D. (2003, June). Varying sliding surface control of an induction machine drive. In *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003*. (Vol. 1, pp. 93-98).
- [24] Benhaddad, K. (2011). *Commande hybride vectorielle mode glissant d'un moteur asynchrone* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [25] Fateh, B. (2005). Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé a aimants permanents avec minimisation du chattering. *Mémoire de magister, université de Biskra*.
-

-
- [26] Bennour, C. (2012). *Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [27] Benbekri, M. (2012). *Commande à Structure Variable D'un Système Hydraulique CE105* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [28] YAGOUBI, P. B. (2014). *Approches de l'intelligence artificielle pour la commande robuste des systèmes non linéaires* (Doctoral dissertation, Université d'Oran).
- [29] SAOUDI, K., & BEN TATA, M. (2020). *Commande hybride robuste avec gain*
- [30] Eddine, R. S., & Hocine, B. (2009). *Commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel* (Doctoral dissertation, Université Mentouri Constantine).
- [31] Zouaoui, Y. (2018). *Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone* (Doctoral dissertation).