



Université ABBES LAGHROUR Khenchela

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Industriel

جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*Présenté pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle**

### THEME

***Modélisation, simulation d'un système  
de suspension active (automobile)***

Réalisé par :

**AOUNALLAH Oussama**

**RAHALI Adil**

**Soutenu le 29 / 06 / 2022**    **Devant le jury composé de :**

<b>Mr. MAALEM Ali</b>	<b>Président</b>	<b>Université Abbes Laghrou-Khenchela</b>
<b>Mr. BERKANI Abdelhakim</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université Abbes Laghrou-Khenchela</b>
<b>Mr. BESSAM BESMA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université Abbes Laghrou-Khenchela</b>

***Promotion 2021/2022***

## *Remerciements*

*Je remercie tout d'abord « Allah » qui m'a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.*

*Je Remercie aussi, mon Encadreur MR.BERKANI*

*Je Remercie également tous les enseignants du  
Département génie industriel*

*Mes collègues et tous les étudiants de Promotion.*

*En fin je remercie tous ceux qui m'ont aidé De Près ou  
de loin à réaliser ce travail.*

# *Dédicace*

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père*

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mes très chers frères Haroune et Haithem et ma jolie sœur Moutiaa, que dieux vous donne santé, bonheur et réussite.*

*A ma chère femme Rihab que j'aime tellement.*

*A mes chers amis et mes collègues.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au monde qui sont mes parents, pour tous leurs amours, encouragements, conseil, sacrifices, patiences et confiance.*

*A mes frères et mes sœurs. A toute ma famille sans oublier mes chers amis.*

# Sommaire

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Introduction générale:..... 1

## **Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile**

I.1 Introduction :..... 3

I-2 Historique de la suspension ..... 3

I-3 Définition des systèmes de suspension..... 3

I-4 Composants d'une suspension..... 4

I-4.1 Amortisseur ..... 4

I-4.2 Ressort..... 5

I-4.3 La barre anti-roulis ..... 6

I-4.4 Pneu..... 6

I-4.4.1 Le pneumatique vertical ..... 6

I-4.4.2 Le pneumatique horizontal ..... 7

I-5 Les suspensions dans le monde de l'automobile ..... 7

I-5.1 Le confort..... 7

I-5.2 La tenue de la route ..... 7

I-6 Les types des suspensions..... 8

I-6.1. Les suspensions passives..... 8

I-6.2. Les suspensions semi- actives :..... 9

I-6.3. Les suspensions actives..... 9

I-7 Comparaison des performances des trois types de suspension..... 10

I-8 Conclusion ..... 11

## **Chapitre II: Méthodologie de commande véhicule**

II.1 Introduction..... 13

II -2 Commande PID ..... 13

II-3 Commande Sky-hook ..... 15

II-4 La commande par le Placement de pôles ..... 16

II-5 Suspension Sky-hook ..... 17

II-6 Commande optimale LQG .....	17
II -7 commande active .....	17
II -8 Le modèle mathématique d'une suspension passive .....	18
II -9 Le modèle mathématique d'une suspension active : .....	19
II -10 Conclusion : .....	21

## **Chapitre III: Simulation et réalisation**

III.1. INTRODUCTION .....	23
III-2 Système de suspension passif .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III-3 Système de suspension actif.....	23
III-3-1 Conception sous Simulink.....	23
III-3-2 Résultats obtenus de simulation .....	23
III-3-3 conclusion .....	25
Conclusion générale .....	26
Conclusion générale .....	27
Bibliographies .....	28
Bibliographie .....	29

## Liste des figures

Figure I.1 : exemple des systèmes de suspension des véhicules

Figure I.2 : exemple d'un amortisseur

Figure I.3 : exemple d'un ressort

Figure I.4 : exemple d'un barre anti-roulis

Figure I.5 : exemple d'un système de suspension active

Figure II.1 : Commande d'un système en boucle fermée

Figure II.2 : schéma représentatif d'un correcteur PID

Figure II.3 : schéma d'une suspension commandée en mode sky-hook

Figure II.4 : placement de pôles pour structure générale

Figure II.5 : placement de pôles pour structure générale

Figure II.6 : modèle quart de véhicule de suspension passive

Figure II.7 : modèle quart de véhicule de suspension active

Figure III-1: Blok de système de suspension

Figure III-2: la commande du système par un PID

Figure III-3: le déplacement de la sortie de système de suspension active comparé avec celui de la suspension passive excité par un signal de type bruit blanc dans le domaine temporel

Figure III.4 Déplacement relatif ( $\Delta$ )

Figure III.5 Vitesse relative de la suspension ( $V1 - V2$ )



# **Introduction**

## **générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale:

La plupart des machines mécanique sont soumises à des différents niveaux de vibrations, provenant de sources variées, les automobiles sont les machines mécaniques les plus exposés aux différents types de vibrations (obstacles et autres), pour cela, les automobiles sont munies d'un système de suspension qui varie d'un type à l'autre, et qui comme rôle, de réduire et d'éliminer ces vibrations, qui sont néfastes pour les passagers et pour le véhicule il même.

Donc le système de suspension du véhicule est responsable du confort de conduite et de la tenue de route car la suspension port la carrosserie du véhicule.

Les objectifs de cette étude sont d'obtenir un modèle mathématique pour les systèmes de suspension passif et actifs, et d'obtenir des résultats mathématiques avec une simulation sur MATLAB, à partir de différentes commandes, de différents systèmes de suspension véhicule.

Dans le premier chapitre, nous faisons une étude générale sur la suspension automobile, tout d'abord, nous parlons des différents composants du système de suspension, puis, nous procédons à faire une comparaison entre les trois types de ce système.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la méthodologie de plusieurs commandes, et les équations avec lesquelles fonctionne chaque système, et aussi, nous faisons une étude des modèles mathématiques d'une suspension active et une suspension passive.

Dans le troisième chapitre nous présentons dans une première partie, une introduction du Simulink (du logiciel MATLAB). Dans une deuxième partie nous verrons les résultats de cette simulation.

Dans le dernier chapitre nous procédons à faire une conclusion sur l'ensemble des applications réalisées et aux perspectives de continuité.

# **Chapitre I:**

## **Généralité sur les systèmes des suspensions automobile**

# **Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile**

---

## **I.1 Introduction :**

Dans ce premier chapitre on donne un aperçu général sur la suspension automobile, tout en commençant par un historique du système de suspension, puis en passant à la définition détaillée dudit système, aussi nous parlons des différents composants. Et à la fin du chapitre, nous faisons une comparaison entre les différents types du système de suspension (la suspension passive, active et semi-active).

## **I-2 Historique de la suspension**

Les suspensions ont été créées pour la première fois dans les véhicules comme une suspension pneumatique en 1920 mais elles étaient trop peu fiables pour une utilisation soutenue, au huitième siècle, avait lieu une suspension primitive basée sur un système développé de chaîne de fer. C'est donc en 1958 que GM a commencé à utiliser ce type d'installation dans leurs véhicules commerciaux.

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.

De diverses conceptions ont été élaborées jusqu'au siècle dernier basée sur un ressort et un amortisseur.[1]

Maintenant beaucoup de véhicules offrent une suspension commandée.

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.

## **I-3 Définition des systèmes de suspension**

Le système de suspension de voiture comme le montre la figure ci-dessus, est un élément indispensable, il se compose d'un ressort et d'un amortisseur, ils changent selon le type de suspension. Peut-être décrit comme étant l'ensemble des éléments qui relient le châssis aux roues.

Le système de suspension doit tout d'abord supporter le poids du véhicule. En général, La fonction principale de la suspension est définie par deux critères : le confort et la tenue de route de véhicule routier. [2]

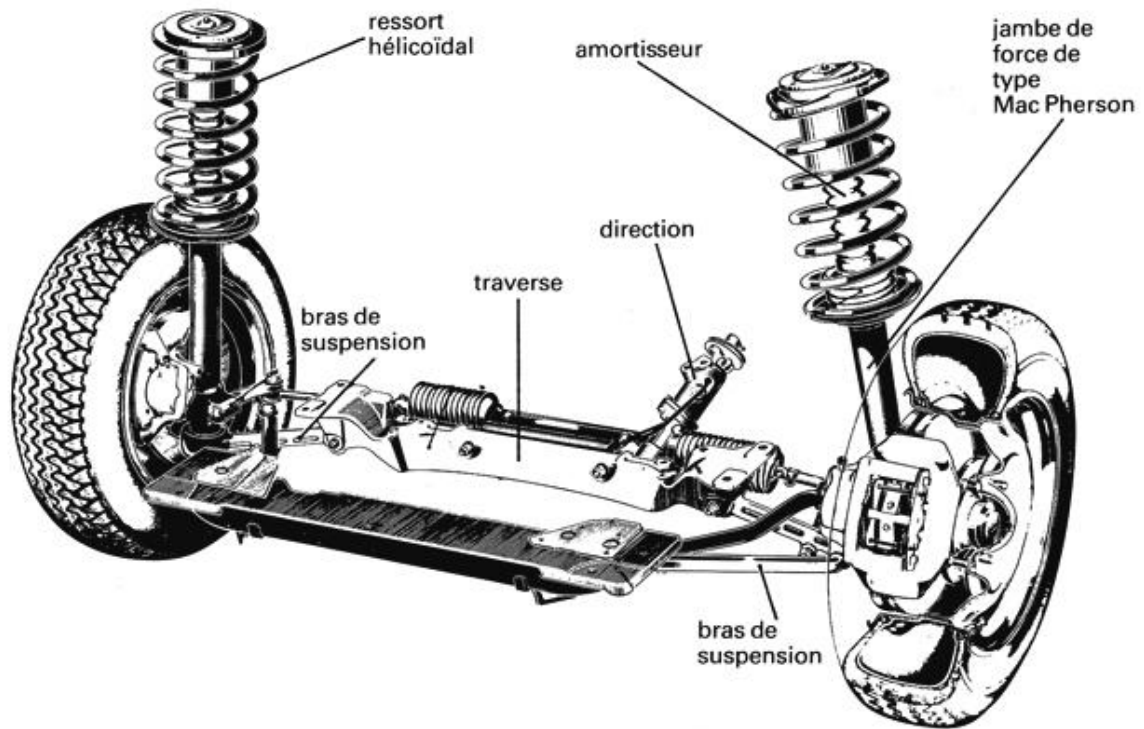


Figure I.1 : exemple des systèmes de suspension des véhicules

### I-4 Composants d'une suspension

La suspension est composée de plusieurs composants ; ces composants offrent une variété de fonctions, qui sont toutes complémentaires. Les plus importants sont donnés. Il y a trois composants importants dans la suspension sont :

#### I-4.1 Amortisseur

Le rôle de l'amortisseur est de modérer et d'améliorer le débattement de la suspension en l'amortissant afin d'éviter de rebondir. Cela permet donc de renforcer le rôle de la suspension en l'améliorant, c'est un composant important au niveau de la suspension du véhicule, il existe une variété de géométries et de motifs différents parmi lesquels ont choisis et détermine le mode de fonctionnement et la nature de la suspension. [3]



**Figure I.2 : exemple d'un amortisseur**

### **I-4.2 Ressort**

Le ressort de suspension est associé à la roue de demi-train avant et arrière de la voiture.

Du fait par sa déformation flexible, il peut absorber des chocs lorsqu'il est précontraint en collaboration avec l'amortisseur. Il récupère l'énergie collectée lors de la compression, permettant à la suspension de revenir en permanence à sa position d'équilibre [1]. Son rôle est important pour la tenue de route du véhicule.



**Figure I.3 : exemple d'un ressort**

# Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile

## I-4.3 La barre anti-roulis

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. [4,5,6,7]



Figure I.4 : exemple d'une barre anti-roulis

## I-4.4 Pneu

Bandage déformable et élastique, que l'on fixe à la jante des roues de certains véhicules et qui, le plus souvent, sa fonction première est l'adhérence, mais il se déforme également pour jouer un rôle similaire à celui d'un amortisseur. C'est un élément nécessaire pour gérer le comportement d'un véhicule. Il transfère les forces longitudinales et latérales pour l'accélération et le freinage, ainsi que les forces de virage [1], Celles-ci sont de deux types, vertical ou horizontal.

### I-4.4.1 Le pneumatique vertical

Ce type de modèle est linéaire et pourra être utilisé dans synthèse des lois de commande.

Le pneumatique peut être modélisé par un simple ressort en parallèle avec un amortisseur. En pratique la raideur du ressort est généralement considérée comme constante et son amortissement est souvent négligeable ; c'est pourquoi le pneumatique est souvent modélisé par un simple ressort. En pratique l'amortissement est faible pour éviter l'échauffement. [8]

# **Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile**

---

## **I-4.4.2 Le pneumatique horizontal**

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. [8]

## **I-5 Les suspensions dans le monde de l'automobile**

Les suspensions d'un véhicule sont les éléments permettant de relier les masses non suspendues (typiquement la roue, les pièces d'entraînement de roue, souvent les systèmes de freinage, etc.) aux masses suspendues (typiquement le châssis, le moteur et tous les composants du véhicule fixés au châssis).

L'utilisation de la suspension est imposée par les irrégularités de la surface sur laquelle se déplace le véhicule. Elle en diminue l'impact sur l'engin, réduisant la fatigue mécanique et l'usure excessive, améliorant le confort des passagers et maintenant le contact entre les roues et le sol malgré ses irrégularités : condition indispensable à la tenue de route. Par ailleurs la masse du véhicule nécessite l'utilisation d'un mécanisme de rappel pour éviter que le système ne s'affaisse indéfiniment au fur et à mesure des aspérités du terrain.

Ainsi, la suspension se compose d'un dispositif de liaison entre les « masses non suspendues » et les « masses suspendues », d'un ressort et d'un amortisseur.

On distingue aussi les suspensions « à roues indépendantes » dans lesquelles sur un même essieu la partie gauche est séparée de la partie droite, des suspensions « à essieu rigide » où les parties gauche et droite sont liées.

### **I-5.1 Le confort**

Le confort permet de décrire la capacité d'un véhicule. Les vibrations provenant principalement des routes inégales sont transmises et filtrées au passager. En fonction de l'accélération transmise et des vibrations verticales, les passagers peuvent ressentir une gamme d'inconfort. La recherche du confort passe, entre autres, par la limitation des déplacements de la caisse enregistreuse. [9]

### **I-5.2 La tenue de la route**

La tenue de route représente la stabilité d'un véhicule, elle est relative à la capacité du véhicule à suivre la trajectoire que le conducteur souhaite lui imposer.



# Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile

---

Lors d'un virage ou d'un changement de direction, la tenue de route désigne la capacité du véhicule à fournir une force longitudinale (en cas d'accélération ou de freinage) et latérale (en cas de virage) entre le pneumatique et la route afin de résister aux perturbations extérieures ou répondre aux instructions du conducteur. [9]

## I-6 Les types des suspensions

Les systèmes de suspensions peuvent être classés en trois types : suspension passive, suspension semi-active et suspension active.

### I-6.1. Les suspensions passives

La suspension passive est la plus utilisée par les constructeurs d'automobile, et elle est installée dans la majorité des véhicules du monde entier. Généralement se compose d'un ressort et d'un amortisseur sous forme d'un support parallèle, ça fonctionnement est basée sur le principe de la dissipation d'énergie par l'amortisseur.

D'abord le ressort fourni une force qui dépend de l'écart de position entre le châssis et la roue. D'autre part l'amortisseur exerce une force en fonction de la différence entre la vitesse de la roue et celle du châssis.

L'un des points faibles de ce type de suspension c'est que Les coefficients de ressort et d'amortissement sont fixes, par conséquent ses performances sont limitées.

La force du ressort dépend de l'élongation de celui-ci tandis que l'amortisseur exerce une force en fonction de la différence entre la vitesse de la masse suspendue et celle de la masse non suspendue. Dans les cas d'amortissement passifs les plus usuels, la force développée par l'amortisseur est supposée dépendre linéairement de la vitesse :

$$F_{amortisseur} = C(Z_{roue} - Z_{caisse})$$

Où

C : le coefficient d'amortissement supposé constant.

La technologie d'amortissement passive est de loin la plus utilisée et l'amortisseur hydraulique classique est le plus employé. Il est implanté sur la grande majorité des véhicules actuels. Les suspensions passives fonctionnent par réaction uniquement en absorbant une partie de l'énergie d'entrée. Lorsque la suspension est passive, ses caractéristiques ne varient qu'avec l'usure des éléments. Elles ont le même comportement et rendement quelque soient

# **Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile**

---

les situations. Avec ce type de suspensions passives, il existe des fréquences qui ne sont pas bien filtrées, ce qui constitue leur plus grand inconvénient [10].

## **I-6.2. Les suspensions semi- actives :**

Le système de suspension semi active est similaire au système passif tant que tous les éléments (ressort et amortisseur) génèrent respectivement leur propre force, la seule chose qui est différente c'est que le coefficient d'amortissement peut être changé instantanément. Alors la force générée par l'amortisseur est réglable et contrôlable en tout instant par le calculateur de véhicule suivant une procédure qui est la suivante :

Les données des capteurs de vitesse sont transmises au calculateur de véhicule ce dernier fait le traitement et donne les valeurs requises pour régler l'amortisseur afin d'atténuer les vibrations du châssis de véhicule

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, [10, 11, 12].

L'amortisseur semi actif est représenté par le même symbole qu'un amortisseur visqueux, mais avec une flèche qui indique que la force d'amortissement produite est variable

## **I-6.3. Les suspensions actives**

La suspension active est l'ensemble des connaissances techniques en mécanique et en électronique, on peut dire que c'est un appareil de haute technologie plus complexe elle est caractérisée par le fait que toutes les parties des forces de suspension sont générées par des actionneurs nécessitant une source d'énergie externe. Ces forces sont contrôlées au travers des asservissements en boucles fermées qui régissent les efforts ou les déplacements. Cependant la puissance consommée par ce type de suspensions est très importante et peut atteindre dans certain cas des valeurs proches de trente kilowatts, ce qui équivaut à la puissance du moteur à faible puissance.

Il produira directement à partir d'un actionneur commandé une force d'inertie contre la force extérieure, afin de réduire les vibrations et les changements de position de véhicule. Cette nouvelle technologie de suspension nous offre des meilleures performances de tenue de route et de confort. Mais il faut accomplir ces trois conditions pour qu'elle puisse fonctionner :

# Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile

1. Source d'énergie capable de générer la force.
2. la mise en œuvre des composants qui peuvent passer une telle force et aussi travailler continuellement.
3. possède une grande variété des capteurs et les données configurées pour les opérations de micro-ordinateur et déterminer le mode de contrôle



Figure I.5 : exemple d'un système de suspension active

## I-7 Comparaison des performances des trois types de suspension

Tableau I.1 : Les 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	Electronique Magnétique

## **Chapitre I: Généralité sur les systèmes de suspensions automobile**

		Hydraulique	Hydraulique
<b>La bande passante</b>	Inconnu	Plus de 20Hz	Moins de 15Hz
<b>La consommation d'énergie</b>	Zéro	Très petite	Grande
<b>Caractéristique de la dynamique verticale</b>	Non	Moyenne	Bon
<b>Caractéristique de la dynamique latérale</b>	Non	Moyenne	Bon
<b>Les couts</b>	Plus bas	Moyenne	Plus haut

### **I-8 Conclusion**

Dans ce chapitre on a donné une vue générale sur les systèmes de suspension, on a trouvé que les suspensions intelligentes peuvent réaliser une bonne relation entre le confort durant la conduite et la tenue de route du véhicule, et pour avoir un meilleur confort.

# **Chapitre II:**

## **Méthodologie de commande véhicule**

## II.1 Introduction

Les niveaux de vibrations provenant de obstacles influent négativement sur le système de suspension des véhicules. La suspension automobile a pour but de réduire ces vibrations [13]

Dans Ce chapitre évoque une description de quelques stratégies de commandes des systèmes de Suspension en investiguant leurs principes et leurs développements.

La commande en boucle améliore totalement le comportement dynamique d'un système tout en ajustant ses modes Propres son état transitoire et sa stabilité.

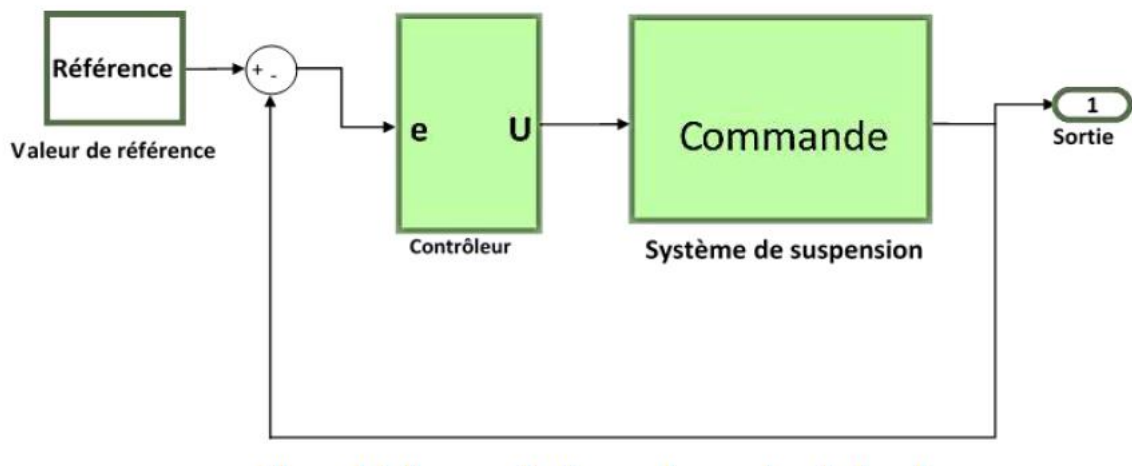


Figure II.1 : Commande d'un système en boucle fermée

Dans la littérature on retrouve plusieurs types de commandes :

- ❶ La commande par Placement de pôles
- ❷ La commande LQG optimale
- ❸ La commande dite Sky-hook

## II -2 Commande PID

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie ou ses qualités de correction s'appliquent a de multiples grandeurs physiques [14].

ce signal d'erreur est exprimé par cette relation :

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

Avec :

$r(t)$  : La consigne

$c(t)$  : La mesure

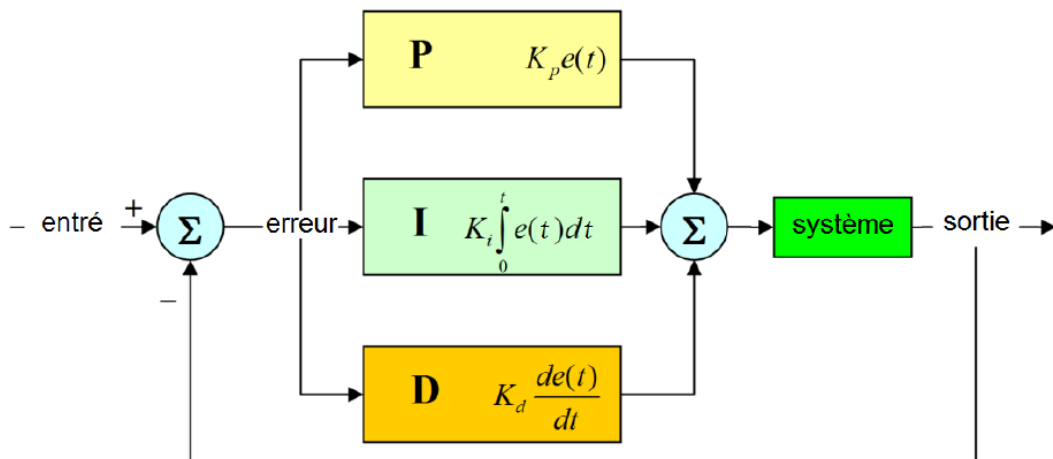


Figure II.2 : schéma représentatif d'un correcteur PID

Un correcteur PID est exprimé par la formule suivante :

$$u(t) = k[e(t) + \frac{1}{t_i} \int e(t)dt + t_d \frac{d}{dt} e(t) \dots\dots\dots[1]$$

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \dots\dots\dots[2]$$

D'ou :

$k_p=K$ : Le gain proportionnel

$k_i=K*\frac{1}{t_i}$ : Le gain intégral

$k_d=K*Td$ : Le gain dérivé

$T_i$  : Temps d'intégration du correcteur

$T_d$  : Temps de dérivation du correcteur

II-3 Commande Sky-hook

Le principe de cette commande est d’obtenir un comportement de la suspension identique à celui d’un système fictif dans lequel la caisse serait « accrochée au ciel » par un amortisseur fictif.

La commande Sky-hook pour un modèle à un quart de roue d’un véhicule consiste à substituer l’amortisseur se trouvant entre la roue et la caisse en un autre entre la caisse et le ciel. Ce ciel est considéré comme un point d’altitude fixée et se déplaçant à la même vitesse horizontale que le véhicule, de manière à ce que l’amortissement de la caisse ne dépende que de la vitesse de déplacement vertical du véhicule et pas de celle de la roue [19,20], ce modèle fictif permet de régler indépendamment l’amortissement du mouvement vertical de la caisse et de celui de la roue la figure représente le modèle de la suspension désirée

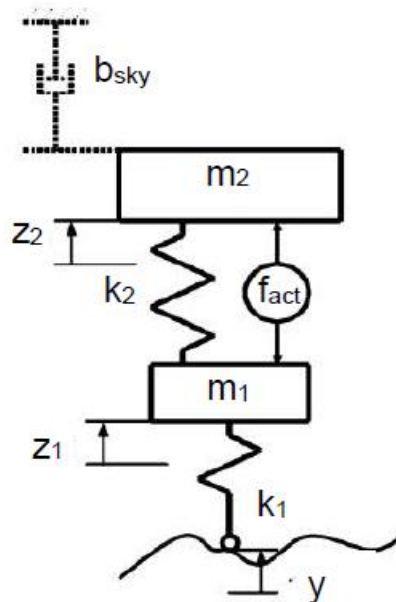


Figure II.3 : schéma d’une suspension commandée en mode sky-hook

Ce système est régi par les équations suivantes :

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_1(z_1 - y) - k_2(z_2 - y) - f_{act} = 0 \text{ -----}[3]$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + k_2(z_2 - z_1) + f_{act} = 0 \text{ .....}[4]$$

Cette commande est définie par :



$$f_{act} = f_{skyhook} = b_{sky} \cdot \dot{z}_2$$

$f_{act}$  : force de l'amortisseur

$z_2$  : vitesse de déplacement du châssis

### II-4 La commande par le Placement de pôles

La méthode du placement de pôles est une technique de synthèse des régulateurs linéaires qui peut être réalisée soit en utilisant une approche fonction de transfert, soit en utilisant une approche d'état.

Elle est basée sur plusieurs points fondamentaux que nous précisons à nouveau ici dans le cas des systèmes linéaires. [15]

Il consiste à trouver un régulateur stable qui permet de choisir librement les pôles du système en boucle fermée.

La structure générale de la boucle fermée pour un régulateur à un ou à deux degrés de liberté correspond au schéma donné respectivement par ces figures la II.4 et II.5

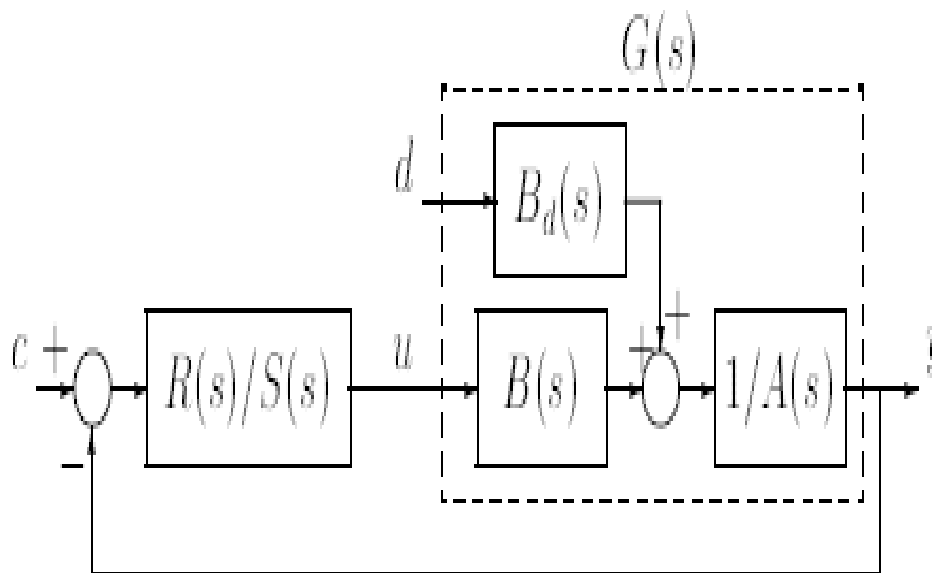


Figure II.4 : placement de pôles pour structure générale

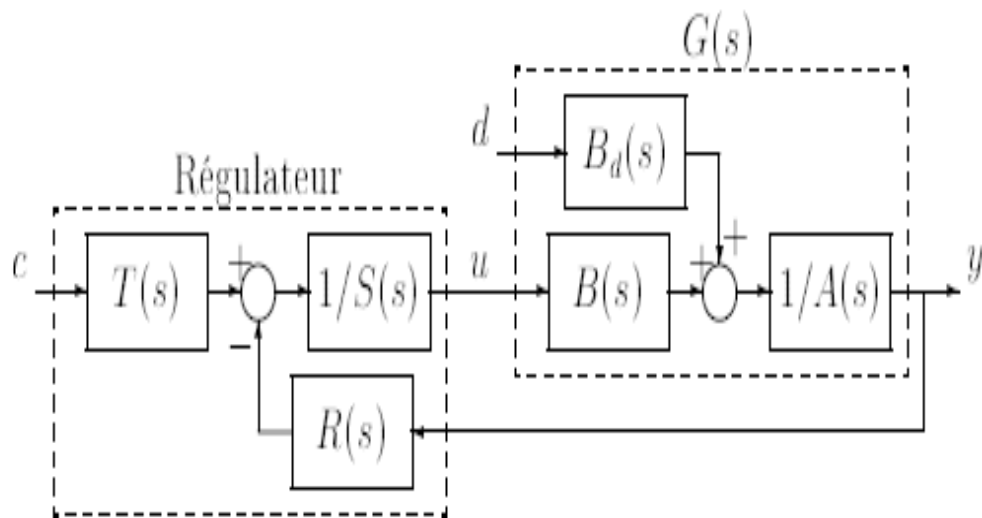


Figure II.5 : placement de pôles pour structure générale

### II-5 Suspension Sky-hook

Cette commande est spécifique aux suspensions. Elle dispose de peu de paramètres de réglage c'est un avantage pour la rapidité de la synthèse de la loi de commande. Mais c'est un inconvénient pour la gestion du compromis entre atténuation et filtrage du déplacement de la caisse. Elle est donc plus indiquée pour première approche simple de la commande de suspension.

### II-6 Commande optimale LQG

Cette commande est très répandue pour la régulation de suspension. L'inconvénient de cette méthode est le critère est peu sensible aux pics de forte amplitude et de faible durée. [15]

### II -7 commande active

Comme son nom l'indique le système de suspension ressort amortisseur est remplacé par un autre composé d'un actionneur généralement hydraulique contrôlé par un système embarqué à base de microprocesseur qui est le lieu d'un algorithme de commande issu de la théorie de la commande optimale des systèmes. Et une source d'alimentation des composants déjà cités. Parmi les commandes actives on retrouve la commande en mode glissant dite skyhook qu'on retrouve dans les commandes semi actives [17]

*Force actionneur = coefficient amortissement amortisseur fictif \* vitesse de châssis*

## II -8 Le modèle mathématique d'une suspension passive

La figure (II.6) soumet un modèle quart de véhicule d'un système de suspension passive où le châssis est représenté par la masse suspendue

**M1** et la roue représentée par la masse non suspendue

**M2**. La roue est connectée au châssis de véhicule à travers un ressort avec un coefficient de raideur

**k1** et un amortisseur avec un coefficient d'amortissement

**D**, Le pneu est modélisé par un simple ressort de rigidité

**k2** sans amortisseur.

En outre, la variable

**X0(t)** représente le mouvement vertical de la masse suspendue et celui de la masse non suspendue est représenté par la variable

**X2(t)**. et finalement

**Xi(t)** représente le profil de l'état de la route [18]

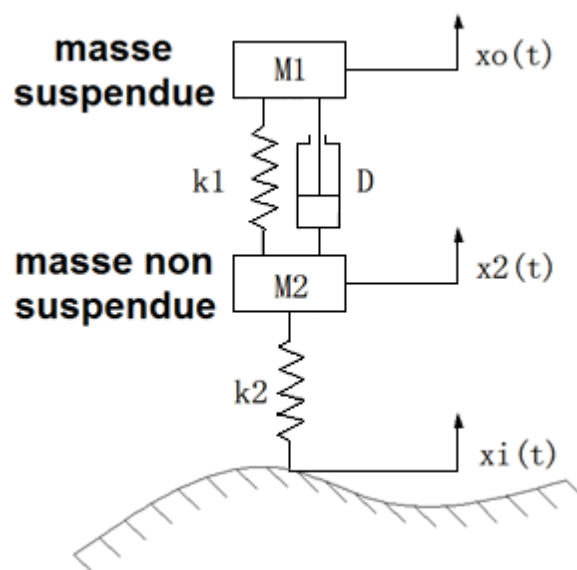


Figure II.6 : modèle quart de véhicule de suspension passive

Le modèle de quart de véhicule à deux degrés de liberté qu'on a obtenu nous permet d'analyser les dynamiques de ce système de suspension passive, à partir les équations différentielles suivantes :

$$M_1 x_0''(t) + D [x_0(t) - x_2(t)] + k_1 [x_0(t) - x_2(t)] = 0 \dots\dots\dots [5]$$

$$M_2 x_2''(t) + D [x_0(t) - x_2(t)] + k_1 [x_2(t) - x_0(t)] + k_2 [x_2(t) - x_i(t)] = 0 \dots\dots\dots [6]$$

On écrit ces deux équations dans le domaine de Laplace on obtient :

$$M_1 s^2 X_0(s) + D s X_0(s) - D s X_2(s) + k_1 X_0(s) - k_1 X_2(s) = 0 \dots\dots\dots [7]$$

$$M_2 s^2 X_2(s) + D s X_0(s) - D s X_2(s) + k_1 X_2(s) - k_1 X_0(s) + k_2 X_2(s) - k_2 X_i(s) = 0 \dots\dots\dots [8]$$

Depuis les deux équations précédentes on peut résoudre la fonction transfert du système comme suit :

$$H(s) = \frac{x_0(s)}{x_i(s)} \dots\dots\dots [9]$$

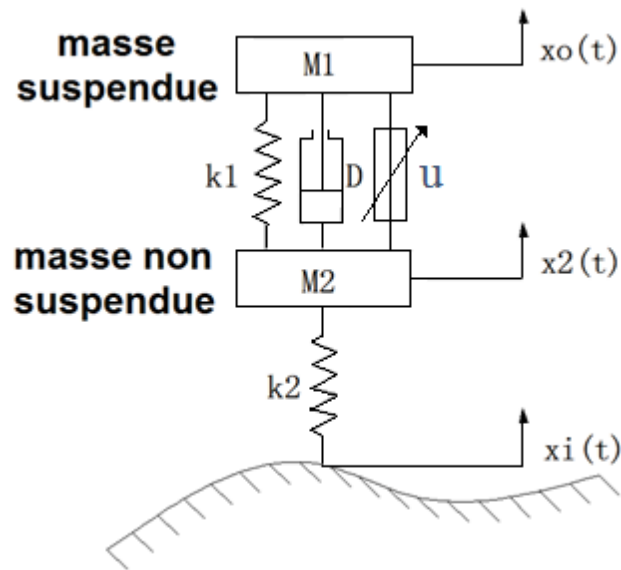
Cette fonction transfert caractérise le déplacement du châssis de véhicule par rapport au chaussé, et elle s'écrit comme suit :

$$H = \frac{x_0}{x_i} = \frac{k_2(Ds+k_1)}{M_1 M_2 s^4 + (M_1 + M_2) D s^3 + (M_1 K_1 + M_1 K_2 + M_2 K_1) s^2 + D k_2 s + k_1 k_2} \dots\dots [10]$$

**II -9 Le modèle mathématique d'une suspension active :**

La figure ci-dessous présente un modèle quart de véhicule d'un système de suspension active. Les symboles M1, M2, X0(t), X2(t) et Xi(t) représentent les mêmes paramètres de la suspension passive. Cependant on ajoute le paramètre

« **u** » qui représente la force générée par l'actionneur de la suspension active.



**Figure II.7 : modèle quart de véhicule de suspension active**

D'après ce modèle de quart de véhicule à deux degrés de liberté de suspension active et la loi de Newton. On peut décrire la dynamique de ce système par les équations suivantes :

$$m_1 \ddot{x}_0(t) + D [\dot{x}_0(t) - \dot{x}_2(t)] + k_1 [x_0(t) - x_2(t)] = u \dots [11]$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) - D [\dot{x}_0(t) - \dot{x}_2(t)] + k_1 [x_2(t) - x_0(t)] + k_2 [x_2(t) - x_i(t)] = -u \dots [12]$$

La représentation de système sous forme d'espace d'état suivant l'équation :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \dots [13]$$

Si on prend :

$$x_1 = x_2$$

$$x_2 = x_0(t)$$

$$x_3 = \dot{x}_2$$

$$x_4 = \dot{x}_0(t)$$

La matrice des variables d'état  $X$  sera la suivante :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots [14]$$

Et la matrice de la commande sera comme suit :

$$u = \begin{matrix} x_i(t) \\ u \end{matrix} \dots\dots\dots [15]$$

Et la matrice *A* et *B* seront :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_2} & \frac{k_1}{m_2} & -\frac{D}{m_2} & \frac{D}{m_2} \\ \frac{k_1}{m_1} & -\frac{k_1}{m_1} & \frac{D}{m_1} & -\frac{D}{m_1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots [16]$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{1}{m_2} \\ 0 & -\frac{1}{m_1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots [17]$$

La matrice de sortie *Y* de ce système de suspension est exprimée par l'équation suivante :

$$Y = CX + DU \dots\dots\dots [18]$$

En prenant :

$$Y = \begin{bmatrix} k_2[x_i(t) - x_1] \\ \ddot{x}_2 \\ x_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots [19]$$

Par changement des variables on trouve :

$$D = \begin{bmatrix} k_2 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots [20]$$

$$C = \begin{bmatrix} -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & -\frac{k_1}{m_1} & \frac{D}{m_1} & -\frac{D}{m_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots [21]$$

**II -10 Conclusion :**

On a donnée et analysé les différents modèles utilisés pour la commande de véhicule.

Ces différents modèles de commande seront adoptés dans le prochaines chapitres pour la simulation et la discussion les résultats.

# **Chapitre III:**

## **Simulation et résultant**

III.1. introduction

Les vibrations causées par les différents causes (état général de la route, des forces de trainée, de la transmission ou des vibrations du moteur, la non uniformité du contact roue/sol. Les ralentisseurs et les trous de la route sont la principale cause de vibrations du véhicule à travers l'ensemble roue/sol et le système de suspension), sont réduites par le système de suspension automobile.

Dans ce chapitre nous procédons à donner une simulation de quelques commandes et étudier le comportement (déplacement relatif) d'un véhicule à travers son passage sur une chaussée dotée d'un profil bien déterminé.

III-2 Système de suspension actif

III-2-1 Conception sous Simulink

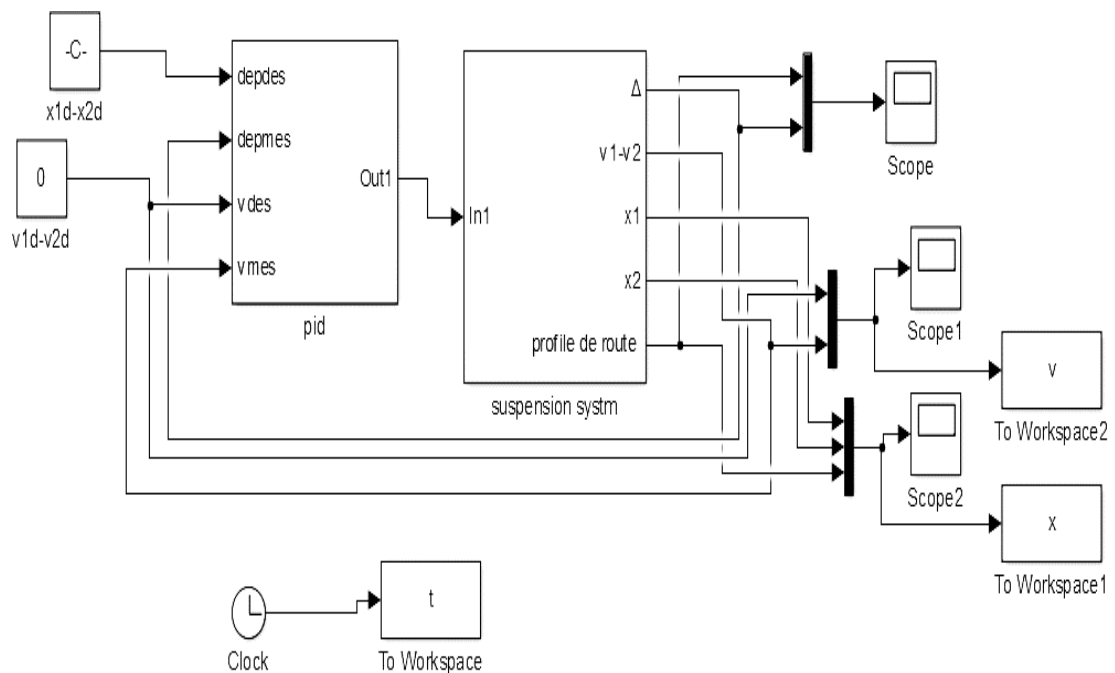


Figure III-1 : la commande du système par un PID

III-2-2 Résultats obtenus de simulation



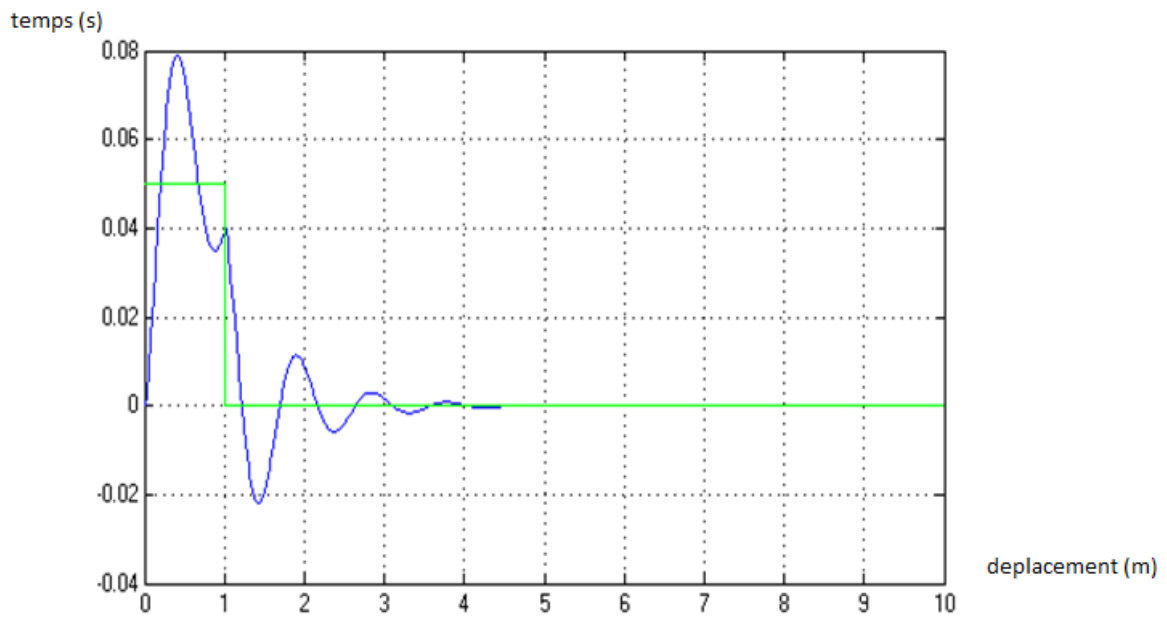


Figure III.2 Déplacements du châssis-roue avec p la perturbation (x1, x2, p)

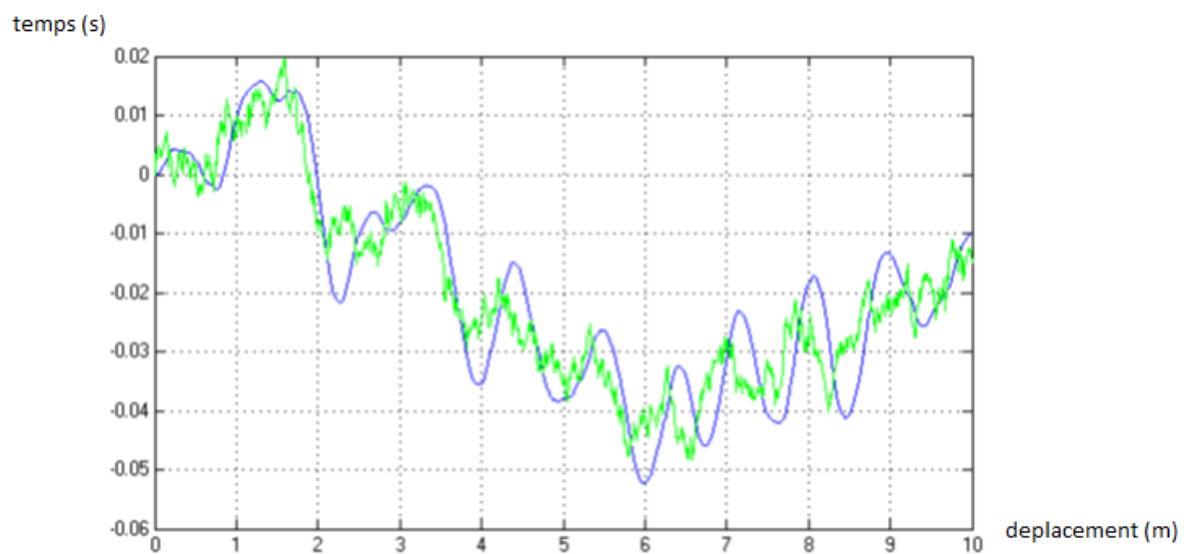
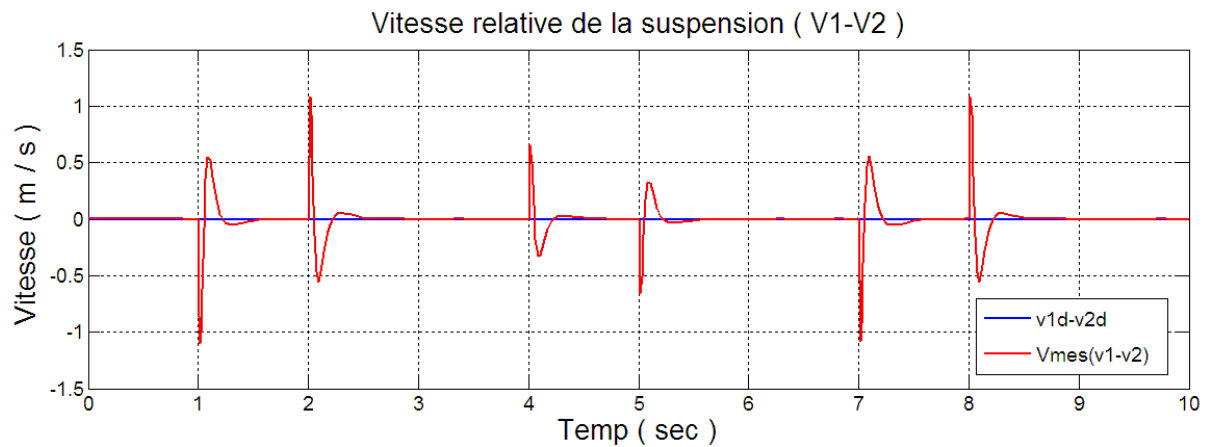


Figure III.3 Déplacement relatif ( $\Delta$ )



**Figure III.4** Vitesse relative de la suspension (V1 – V2)

### III-2-3 conclusion

Comme conclusion de ce chapitre, on constate qu'un véhicule avec un système de suspension actif, d'une commande PID, nous fournit les meilleures performances par rapport aux autres systèmes, tel que le Déplacements du châssis-roue (comme le montre la figure 3.7) ce taux de déplacement diminue d'une façon rapide (environ 4 secondes).

Alors d'après notre étude, on peut conclure que ce système est le meilleur par rapport aux autres systèmes étudiés, car il nous assure de très bonnes performances

# **Conclusion**

## **générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons commencé par une définition du système de suspension dans un véhicule, son historique, les différents composants de ce fameux système, et ainsi une étude des trois différents types de suspension (Active, Semi-Active et passive), on a aussi constaté comment influe le système de suspension, sur le confort et la tenue de route de l'automobile.

Après cela, nous avons étudié plusieurs commandes du système de suspension automobile, une définition de chaque commande, le mode de fonctionnement et ainsi les équations et les formules mathématique avec lesquelles s'exercent chacune de ces commandes, et aussi leurs développements.

La simulation d'un système de suspension actif d'une commande PID, via le Simulink (du logiciel MATLAB) montre que ce système présente les meilleures performances (Déplacements du châssis-roue avec p la perturbation, Déplacement relatif, Vitesse relative de la suspension) par rapport aux autres systèmes.

D'après cette étude approfondie, on peut conclure que le système avec un contrôleur PID, assure des meilleures performances, et réussie à réduire un grand pourcentage, l'accélération et le déplacement vertical du véhicule, et aussi, ce système nous fournit un meilleur confort, et une très bonne tenue de route.

# **Bibliographies**

## Bibliographies

---

### Bibliographie

- [1] Charles WS Gheorghe G et Marius G Emanuele G, Tudor S. Semi-active suspension control. ISBN978-1-84800-230-2, 2008.
- [2] [BOUATIA Taqiyeddine. Modélisation, simulation et commande d'un système de suspension active. 2019.].
- [3] [ Lamamra.B. control semi actif d'une suspension d'un véhicule terrestre. Biskra 2015.]
- [4] [N. Lagraa, D. Boukhetala, G. Bloch, and F. Boudjema, Nonlinear control design of active suspension based of full-car model. Archives control sciences, 17(LIII) (3-4):357–375, 2007. ] ,
- [5] [kara-Zaitri et N. Messaoudi, Commande neuro-floue d'une suspension active de véhicule, PFE, Ecole nationale polytechnique, juin 2006]
- [6] [Mohd rizal bin ahmed ;A project report submitted in partiel fulfilment of the requirement for the award of the degree of master of Engineering university Malaysia Page 8,10 Nov 2007]
- [7] [Y.Chakhchoukh, Modélisation et commande par logique floue d'une suspension active d'un véhicule, PFE en automatique à l'école nationale polytechnique, juin2004]
- [8] [ Mr. OUAGUENI Fayssal Modélisation et Commande Floue Stabilisante de la Suspension Active de Véhicule 2020 ]
- [9] [Nasreddine BOURAOUI et Imad REZAI. Modélisation et commande h∞de suspension de véhicules.]
- [10] [Hussein S, Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnéto rhéologique pour l'automobile, Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.].
- [11] [ Bouazara, Étude et analyse de la suspension active et semiactive des véhicules routiers. PhD Thesis, Faculté des Études Supérieures de l'université Laval, 1997,].
- [12] [Damien Sammier. Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles. Thèse de doctorat, Laboratoire d'automatique de Grenoble, France, 2001 ]
- [13] [Samuel gos selim – brisson « étude d'un système de contrôle pour suspension automobile » mémoire présenter a l'université du Québec a Chicoutimi (page1)]

## Bibliographies

---

[14] [Wikipédia (Régulateur PID)]

[15] [olivier gehan ,ensicaen, novembre 2020]

[16] [Damien Sammier. Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles. Thèse de doctorat, Laboratoire d'automatique de Grenoble, France, 2001 page (106)]

[17] [BENGATRAN f .BENSID M B ‘’ Commande du système de suspension d’un véhicule’’ mémoire université ouargla.. page 21)]

[18] [BOUATIA Taqiyeddine «MODELISATION, SIMULATION ET COMMANDE D’UN SYSTEME DE SUSPENSION ACTIVE » page 11 ]

[19] [mark w spong seth hutchinson and M.vidya sagar . Robot Modeling and control]

[20] [Asma Kotrane ‘’ conception, réalisation et caractérisation dynamique d’un amortisseur magnéto rhéologique à l’Université Montréal ‘’ (page 33)]

## Résumé

**Résumé :** Ce travail de mémoire concerne la modélisation et la simulation d'un système de suspension automobile. Le système de suspension de véhicules a comme rôle d'assurer un meilleur confort et tenue de route en éliminant tout type de vibrations (obstacles et autres), provenant de sources variées on a procédé à faire une définition des différents types de suspensions, et on a étudié le système de suspension active contrôlé par la commande PID, avec une simulation via Simulink du logiciel MATLAB, cette étude nous a confirmé que le système de suspension active présente de meilleures performances par rapport aux autres types, malgré son coût élevé, on peut résumer que ce type est le meilleur.

**Mots clés :** systèmes de suspensions , passive , active ,semi-active ,quart de véhicule, contrôle PID

### التحكم في نظام تعليق المركبة

**الخلاصة:** هذه الرسالة تتعلق بنمذجة ومحاكاة نظام تعليق السيارات ، ودور نظام تعليق السيارة هو ضمان راحة أفضل وثبات على الطريق من خلال القضاء على جميع أنواع الاهتزازات (العوائق وغيرها) ، من مصادر مختلفة ، شرعنا في مع محاكاة عبر PID صنع تعريف الأنواع المختلفة للتعليق ، ودرسنا نظام التعليق النشط الذي يتحكم فيه الأمر ، أكدت لنا هذه الدراسة أن نظام التعليق النشط لديه أداء أفضل مقارنة بالأنواع MATLAB لبرنامج (Simulink) الأخرى ، على الرغم من تكلفته العالية ، يمكننا تلخيص أن هذا النوع هو الأفضل.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة التعليق ، سلبية ، نشطة ، شبه نشطة ، ربع مركبة ، تحكم PID

**Abstract:** This dissertation concerns the modeling and simulation of an automobile suspension system. The role of the vehicle suspension system is to ensure better comfort and road holding by eliminating all types of vibrations (obstacles and others), from various sources we proceeded to make a definition of the different types of suspensions, and we studied the active suspension system controlled by the PID command, with a simulation via Simulink of the MATLAB software, this study confirmed to us that the system of active suspension has better performance compared to other types, despite its high cost, we can summarize that this type is the best.

**Keywords:** suspension systems, passive, active, semi-active, quarter vehicle, control

PID