

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master
Académique

OPTION : ELECTRONIQUE DES SYSTEMES EMBARQUES

Intitulé

Commande PID Floue Adaptative de la
Suspension d'un Véhicule Automobile

Proposé et dirigé Par :

- Dr. OUAGUENI Fayssal

Réalisé par :

- Salaheddine BOUGOUTAIA
- Youcef BOUGOUTAIA

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce travail aux deux personnes les plus chères au monde, mes parents, pour tout leur amour, leurs encouragements, leurs conseils, leurs sacrifices, leur patience et leur confiance.

*Je dédie également ce travail à mes frères et sœurs et à toute la famille **Bougoutaia**.*

Je dédie également ce travail à tous mes amis et professeurs.

Salah eddine

Dédicace

Je dédie ce travail aux deux personnes les plus chères au monde, mes parents, pour tout leur amour, leurs encouragements, leurs conseils, leurs sacrifices, leur patience et leur confiance.

Je dédie également ce travail à mes frères et sœurs Je dédie également ce travail à tous mes amis et professeurs.

Youcf

Remerciement

Tout d'abord, louanges à Dieu, qui m'a aidé et m'a donné patience et force pour mener à bien ce travail, et je remercie le Tout-Puissant Professeur Allah qui m'a accompagné dans la réalisation de cette recherche.

Je remercie également tous les professeurs du département d'électronique qui.

Je remercie également membres du jury de d'avoir évalué ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à mener à bien ce travail.

ملخص

أنظمة التعليق النشط هي أنظمة ديناميكية متعددة المتغيرات يصعب اشتقاق نماذج رياضية لها. لذلك، فإن مخططات التحكم التحليلي المستندة إلى مثل هذه النماذج معقدة في البناء ولا تؤدي بشكل عام أداءً جيداً. ومن ثم، فإن مخططات التحكم الذكية مثل وحدات التحكم PID الضبابية التي يمكنها التحكم في الجزء غير المصمم من ديناميكيات التعليق سهلة التحقيق ويمكن أن تحقق تحكماً دقيقاً. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو فحص أداء نظام التعليق النشط، باستخدام انحراف التعليق لجسم السيارة كمعيار رئيسي للتحكم وPID الضبابي كمخطط تحكم. يصف هذا العمل تطبيق تقنية PID الضبابي للتحكم في نظام تعليق السيارات المثبط باستمرار. أكدت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها جدوى مخطط التحكم المقترح في نظام التعليق النشط.

كلمات مفتاحية: التعليق النشط, التحكم PID الضبابي, نظام ربع مركبة.

Résumé

Les systèmes de suspension active sont des systèmes dynamiques multivariables pour lesquels il est difficile de dériver des modèles mathématiques. Par conséquent, les schémas de contrôle analytique basés sur de tels modèles sont complexes à construire et ne fonctionnent généralement pas bien dans la pratique. Par conséquent, les schémas de contrôle intelligents tels que les contrôleurs à logique floue qui peuvent contrôler la partie non modélisée de la dynamique de la suspension sont simples à réaliser et peuvent donner un contrôle précis. L'objectif principal de ce travail est d'étudier les performances du système de suspension active, en utilisant la déflexion de la suspension de la carrosserie du véhicule comme critère principal de contrôle et le PID floue comme schéma de contrôle. Ce travail décrit l'application de la technique de PID floue au contrôle d'un système de suspension automobile à amortissement continu. Les résultats de simulation obtenus ont confirmé la faisabilité du schéma de contrôle flou proposé dans le système de suspension.

Mots clés : Suspension active, contrôle PID flou, quart de véhicule.

Abstract

Active suspension systems are multivariable dynamic systems for which it is difficult to derive mathematical models. Therefore, analytical control schemes based on such models are complex to construct and generally do not perform well in practice. Hence intelligent control schemes like fuzzy PID controllers that can control the un modelled part of the suspension dynamics are simple to realize and can yield accurate control. The main objective of this paper is to investigate the performance of active suspension system, using suspension deflection of the vehicle body as the principal criterion of control and fuzzy PID as the control scheme. This work describes the application of fuzzy logic technique to the control of a continuously damping automotive suspension system. The simulation results obtained have confirmed the feasibility of the proposed control scheme in active suspension system.

Keywords : Active Suspension, Fuzzy PID Control, quarter of vehicle.

Table des matières

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

Chapitre I : Suspension d'un véhicule automobile

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les différents systèmes de suspension	5
I.2.1. La suspension active	5
I.2.2. La suspension semi-active	6
I.2.3. Les suspensions passive	9
I.3. Modèles de véhicule	10
I.3.1. Modèle quart de véhicule	10
I.3.1.1. Passive	10
I.3.1.2. Active	11
I.3.2. Modèle demi-véhicule	13
I.3.3. Modèle véhicule complet ou 3D	14
I.4. Comparaison des performances des trois types de suspension	16
I.5. conclusion	17

Chapitre II : Commande PID floue

II.1. Introduction	18
II.2. Éléments d'un ensemble flou	18

II.3. Les opérateurs flous	19
II.4. Systèmes d'Inférence flous.....	20
II.4.1. Fuzzification	20
II.4.2. Inférence	20
II.4.3. Defuzzification	21
II.5. Les avantages et les inconvénients de la logique floue	21
II.5.1. Les avantages	21
II.5.2. Les inconvénients	21
II.6. La commande PID.....	21
II.7. Schéma fonctionnel du contrôleur PID	22
II.8. Caractéristiques dynamiques régulateur PID	23
II.9. Les différentes structures du PID	23
II.10. Régulation PID	25
II.10.1. Proportionnel	25
II.10.2. Intégré	26
II.10.3. Dérivé	27
II.11. Avantages et Inconvénients du régulateur PID	28
II.12. Commande PID floue	28
II.13. Etude analytique de la commande PID floue	29
II.14. Structure de la commande PID floue	29
II.15. Types de contrôleurs PID flous	30
II.15.1. Contrôleurs PID floue à entrée unique	31
II.15.2. Deux contrôleurs PID floue d'entrée	31
II.15.3. Trois contrôleurs PID floue d'entrée	32
II.16. Conclusion	33

Chapitre III : Commande PID Floue de la Suspension d'un Véhicule

III.1. Introduction	34
III.2. Mode système de suspension active	34
III.3. Commande PID floue de la suspension active	36
III.3.1. Construction de la commande	36
III.3.2. Résultats de simulation	40
III.4. Conclusion.....	45
Conclusion générale	46
Références bibliographiques.....	47

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison types de suspension.	16
Tableau II.1 : Opérateurs flous.....	19
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients d'un régulateur PID	28
Tableau II.3 : Règles floues du système d'interface floue du contrôleur PID floue.....	30
Tableau III. 1 : Paramètres du modèle quart de véhicule.....	35
Tableau III. 2 : Règles floues pour K_p	39
Tableau III. 3 : Règles floues pour K_i	39
Tableau III. 4 : Règles floues pour K_d	39

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'une suspension active.	6
Figure I.2 : Schéma d'un registre variable.....	7
Figure I.3 : Amortisseur à fluide MR linéaire commercial.....	8
Figure I.4 : Modèle quart de véhicule simplifié semi-actif à deux degrés de liberté Système de suspension.	8
Figure I.5 : Modèle quart de véhicule simplifié passive à Système de suspension.....	10
Figure I.6 : Modèle passive.....	11
Figure I.7 : Modèle quart de véhicule à 2 DDL.	12
Figure I.8 : Modèle de suspension représenté par un demi-véhicule latéral à 4 degrés de liberté.....	14
Figure I.9 : Modèle de véhicule complet.....	15
Figure II.1: Système d'Inférence floue (SIF).....	20
Figure II.2 : Configuration du système de contrôle de base.....	22
Figure II.3 : La structure série.....	23
Figure II.4 : La structure parallèle.....	24
Figure II.5 : La structure mixte.	24
Figure II.6 : Modelisation de la reponse a un echelon dans un asservissement en position. ...	25
Figure II.7 : Modelisation de la reponse a un echelon dans un asservissement en vitesse.	26
Figure II.8 : Modelisation de la reponse a un echelon dans un asservissement en vitesse.	27
Figure II.9 : Structure du contrôleur PID floue.....	29
Figure II.10 : Entrée / sortie des contrôleurs PID Floue.	30
Figure II.11 : Structure de contrôleur de type PD floue.....	31
Figure II.12 : Structure de contrôleur de type PI floue.	32
Figure II.13 : Structure de contrôleur de type PID floue avec base de règles 3-D.	32

Figure III.1 : Modèle quart de véhicule de deux degré de liberté.	35
Figure III.2 : Fonctions d'appartenance des entrées e et e_c	37
Figure III.3 : Fonctions d'appartenance des sorties k_p, k_i et k_d	38
Figure III.4 : Commande de la suspension active (PID et FPID).	40
Figure III.5 : Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route).	41
Figure III.6 : Déplacement vertical du châssis.	41
Figure III.7 : Déplacement relatif du système de suspension..	42
Figure III.8 : Vitesse relatif du système de suspension.	42
Figure III.9 : Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route).	43
Figure III.10 : Déplacement vertical du châssis.	43
Figure III.11 : Déplacement relatif du système de suspension.	44
Figure III.12 : Vitesse relatif du système de suspension.	44

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).

$F_{amortissen}$: la force appliquée 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).

m_s : la masse suspendue (caisse) pour la modèles ½ et complet de véhicule (kg).

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).

Introduction Générale

Introduction générale

Les systèmes de suspension ont été largement appliqués aux véhicules, depuis la calèche avec des ressorts à lames flexibles fixés aux quatre coins, jusqu'à l'automobile moderne avec des algorithmes de commande complexes. Chaque véhicule circulant sur la route au profil aléatoire est exposé à des vibrations néfastes à la fois pour le confort des passagers et pour la durabilité du véhicule lui-même. Différentes perturbations se produisent lorsqu'un véhicule se penche dans un virage (roulage) et plonge vers l'avant lors d'un freinage (tangage). De plus, des vibrations verticales désagréables (rebondissements) de la carrosserie du véhicule peuvent se produire lors de la conduite sur des irrégularités de la route. Ces mouvements dynamiques ont non seulement un effet négatif sur le confort, mais peuvent également être dangereux, car les pneus pourraient perdre leur adhérence sur la route. Par conséquent, la tâche principale d'une suspension de véhicule est d'assurer le confort de conduite et la tenue de route pour une variété de conditions de route et de manœuvres du véhicule. Cela contribuerait à son tour directement à la sécurité de l'utilisateur. Il existe trois types de suspension (suspension active, suspension semi-active et suspension passive).

L'analyse du système de suspension est une partie essentielle de l'ingénierie automobile. Les systèmes de suspension passive sont largement utilisés dans les véhicules terrestres mais ne peuvent pas supprimer efficacement les vibrations du véhicule sous diverses rugosités de la route. Les systèmes de suspension à contrôle actif sont plus élastiques et efficaces que les autres systèmes de contrôle, ce qui rend les systèmes de contrôle actifs plus capables d'offrir une qualité de conduite [1]. Parallèlement au développement rapide de l'industrie automobile, les systèmes de suspension à contrôle actif ont un grand intérêt pour satisfaire les attentes des consommateurs. Ainsi, un système de suspension de véhicule haute performance doit améliorer le confort de conduite du passager. On peut exprimer que le succès de

la réduction des vibrations pour améliorer le confort de conduite est déterminé par deux étapes. En particulier, la modélisation précise et la conception d'un contrôleur approprié ont une grande importance dans la réduction des vibrations du véhicule.

Les contrôleurs les plus connus utilisés dans les processus de contrôle industriel sont les contrôleurs proportionnels-intégraux-dérivés (PID) en raison de leur structure simple et de leurs performances robustes dans une large gamme de conditions de fonctionnement. Cependant, le régulateur PID étant linéaire, n'est pas adapté aux systèmes fortement non linéaires. Le contrôle flou est souvent mentionné comme une alternative au contrôle PID. Le paramétrage à l'aide de règles et de fonctions d'appartenance floue permet d'ajouter facilement des non-linéarités, de la logique et des signaux d'entrée supplémentaires à la loi de contrôle [2-4]. Par conséquent, ces dernières années, les contrôleurs PID floue ont été largement utilisés pour les processus industriels en raison de leur nature heuristique associée à la simplicité et à l'efficacité des systèmes linéaires et non linéaires.

Les objectifs de cette étude sont d'obtenir un modèle mathématique pour les systèmes de suspension passifs et actifs pour le modèle de quart de véhicule et de construire un contrôleur de la suspension active pour un modèle de quart de véhicule soumis à une excitation à partir d'un profil de route utilisant un contrôleur PID floue.

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

Dans le premier chapitre, nous allons expliquer 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 performances des suspensions de voiture, et nous allons également détailler les différents modèles de véhicules, formes mécaniques et différents types de système de suspension.

Dans le deuxième chapitre, nous allons évoquer les différents types de commande dans la littérature de l'automobile (PID, floue et PID Floue) et expliquer leurs principes de fonctionnement en termes d'application et de caractéristiques et la stratégie de commande traditionnelle et avancée dans ces trois types.

Dans le dernier chapitre, nous appliquerons les commandes PID et PID floue au système de suspension active dans l'environnement Matlab/Simulink. 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.

Chapitre I

I.1. Introduction

Tout véhicule circulant sur la route au profil aléatoire est exposé à des vibrations néfastes à la fois pour les passagers en termes de confort et pour la durabilité du véhicule lui-même. Par conséquent, la tâche principale d'une suspension de véhicule est d'assurer le confort de conduite et la tenue de route pour une variété de conditions routières et de manœuvres du véhicule [5]. Habituellement, les irrégularités de la surface de la route, allant des nids de poule aux variations aléatoires du profil d'élévation de la surface, agissent comme une source majeure qui excite les vibrations de la carrosserie du véhicule à travers l'ensemble pneu/roue et le système de suspension.

En général, une bonne suspension doit offrir une conduite confortable et une bonne maniabilité dans une plage de déflexion raisonnable. De plus, ces critères dépendent subjectivement de la destination du véhicule. Les voitures de sport ont généralement des suspensions rigides et dures avec une qualité de conduite médiocre, tandis que les berlines de luxe ont des suspensions plus souples mais avec de mauvaises capacités de tenue de route. Un système de suspension avec un amorti approprié doit être «doux» contre les perturbations de la route et «dur» contre les perturbations de charge. Une suspension fortement amortie donnera une bonne maniabilité du véhicule, mais transfère également une grande partie de l'apport routier à la carrosserie du véhicule [6].

Lorsque le véhicule roule à faible vitesse sur une route accidentée ou à grande vitesse en ligne droite, cela sera perçu comme une conduite difficile. Les conducteurs du véhicule peuvent trouver la conduite brusque répréhensible, ou cela peut endommager physiquement le véhicule. Où une suspension légèrement amortie donnera une conduite plus confortable, mais réduirait considérablement la stabilité du véhicule dans les virages, les manœuvres de changement de voie ou lors de la négociation d'une rampe de sortie. Par conséquent, une conception de suspension est un art de compromis entre ces deux objectifs. Une bonne conception d'une suspension passive peut fonctionner dans une certaine mesure en ce qui concerne le confort de conduite et la tenue de route optimisés, mais ne peut éliminer ce compromis [7].

Dans ce chapitre, nous étudierons différents types de suspension et nous nous focaliserons également sur la suspension active.

I.2. Les différents systèmes de suspension

Les systèmes de suspension peuvent être divisés en trois types: suspension passive, suspension semi-active et suspension active. Cette classification peut être obtenue selon la méthode de contrôle et le principe de contrôle requis, ainsi que tous les composants mécaniques qui relient les roues à la structure principale (châssis) du véhicule.

I.2.1. La suspension active

Les suspensions passives et semi-actives produisent des forces qui sont limitées par les positions et les vitesses relatives entre la caisse et la roue et qui ne peuvent que dissiper de l'énergie.

Les suspensions actives sont des solutions qui permettent de dépasser ces limitations.

La suspension hydractive (Citroën) par exemple permet, en faisant varier à l'aide d'une pompe, la pression du fluide dans la suspension hydraulique, de générer une force indépendante des positions relatives de la caisse et de la roue. Cependant, ces suspensions actives consomment de l'énergie. Et elles consomment d'autant plus que la bande passante de ces suspensions est élevée.

Il existe donc un compromis entre la bande passante de la suspension active et consommation d'énergie.

Ainsi pour des véhicules de tourisme, une suspension active lente est utilisée comme c'est le cas de la suspension hydractive de PSA. L'accent est alors mis sur une faible consommation d'énergie.

A l'inverse, pour des véhicules tout terrain comme ceux des militaires, des suspensions actives plus "rapides" constituées de vérins hydrauliques sont préférées. Le besoin en énergie est alors beaucoup plus grand [8].

Un schéma d'un système de contrôle actif des suspensions est présenté sur la figure 1 Il consiste.

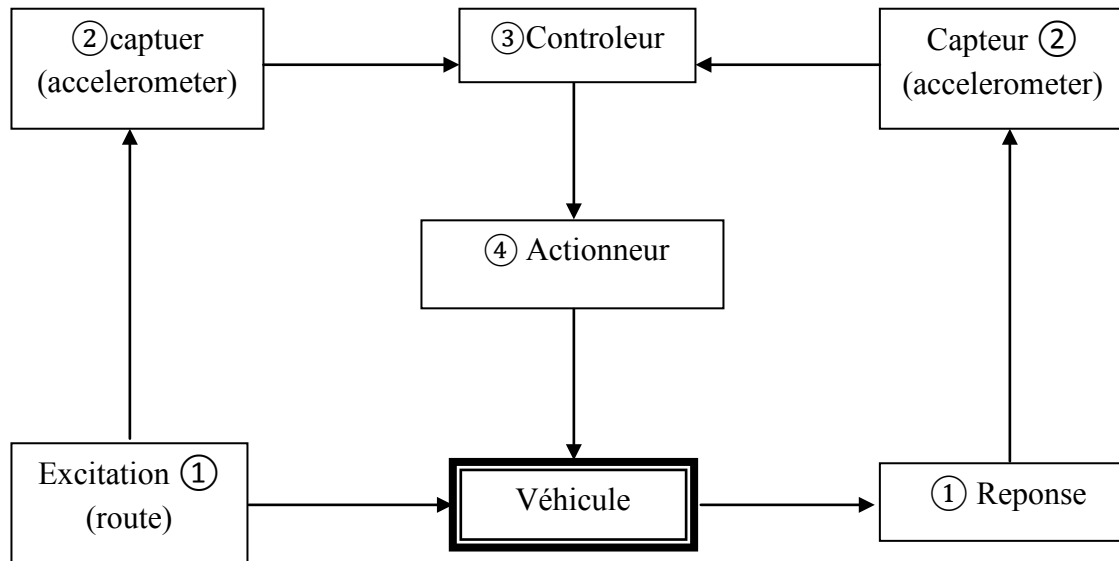


Figure I.1: Schéma d'une suspension active.

Dans un premier temps, les informations telles que l'accélération de la roue et du véhicule sont transmises au contrôleur qui calcule, selon une stratégie de contrôle, la consigne nécessaire à l'actionneur. Ce dernier agit sur le véhicule pour atténuer les vibrations.

I.2.2. La suspension semi-active :

Un système de suspension semi-active utilise un amortisseur variable ou un autre composant de dissipation variable dans la suspension automobile. Un exemple de dissipateur variable est un amortisseur visqueux à double tube dans lequel le coefficient d'amortissement peut être modifié en modifiant le diamètre de l'orifice dans un piston.

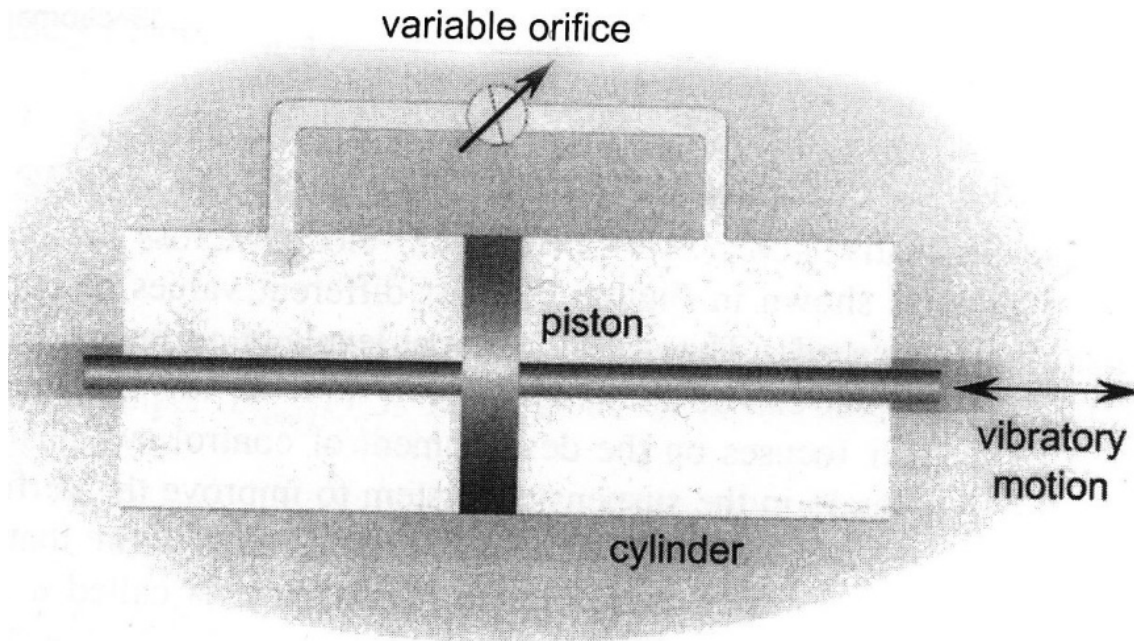


Figure I.2 : Schéma d'un registre variable.

Un autre exemple de dissipateur semi-actif est un amortisseur magnéto-rhéologique (MR) qui utilise un fluide MR. Les fluides MR sont des matériaux qui répondent à un champ magnétique appliqué avec un changement de comportement rhéologique. Typiquement, ce changement se manifeste par le développement d'une limite d'élasticité qui augmente monotiquement avec le champ magnétique appliqué. La force dissipative fournie par l'amortisseur peut être contrôlée en contrôlant le champ électromagnétique.

Par rapport aux systèmes de suspension entièrement actifs, les systèmes semi-actifs consomment beaucoup moins d'énergie. La consommation d'énergie dans un système semi-actif sert uniquement à modifier les caractéristiques de force dissipative en temps réel du dispositif semi-actif. Par exemple, la puissance est utilisée pour changer la surface de l'orifice du piston dans un amortisseur à ouverture variable ou pour changer le courant dans la bobine électromagnétique d'un amortisseur MR.

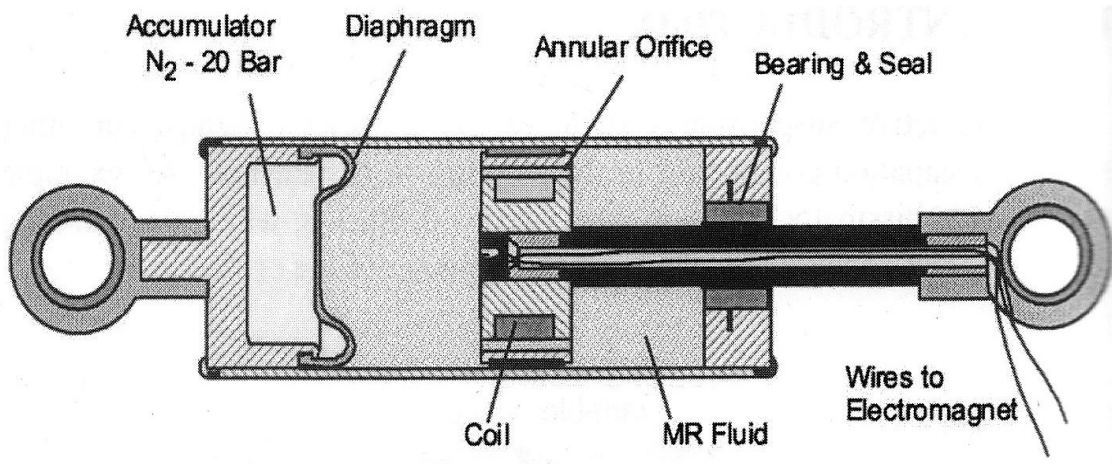


Figure I.3 : Amortisseur à fluide MR linéaire commercial

L'alimentation externe n'est pas directement utilisée pour contrer les forces vibratoires. Les systèmes semi-actifs ne peuvent pas rendre le système de suspension instable contrairement aux systèmes actifs. Ceci est dû au fait qu'ils ne fournissent pas activement d'énergie au système de suspension vibratoire mais n'en dissipent que l'énergie [9].

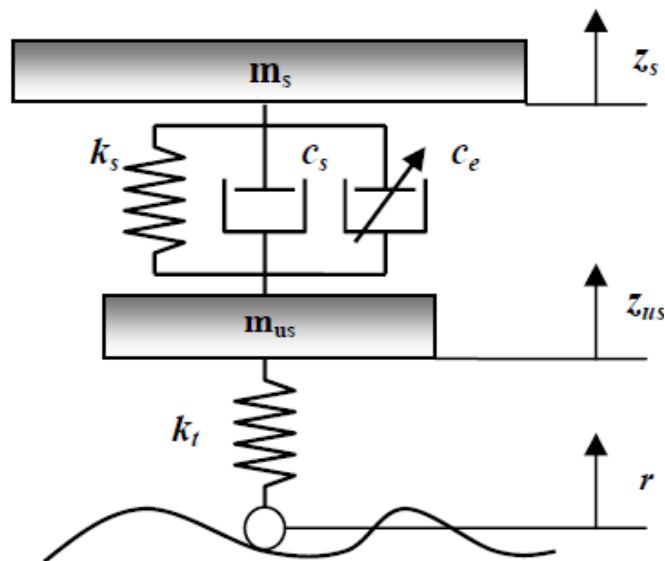


Figure I.4 : Modèle quart de véhicule simplifié semi-actif à deux degrés de liberté. Système de suspension.

I.2.3. Les suspensions passive

Le terme «passive» fait référence au concept physique selon lequel aucune source d'alimentation externe n'affecte le système. Ces types de systèmes de suspension peuvent être trouvés dans la plupart des véhicules conventionnels.

Le système de suspension idéal doit être souple pour le confort de conduite, tout en restant insensible aux charges appliquées. Une bonne maniabilité nécessite un réglage de suspension quelque part entre ces deux. En raison de ces exigences contradictoires, la conception de la suspension de véhicule automobile en utilisant uniquement une suspension passive a été un compromis entre les propriétés souhaitées. Le type d'utilisation du véhicule a donc communément défini quelles valeurs la résistance du ressort et le facteur d'amortissement devraient avoir. Un exemple de ceci est donné sur la figure 5 qui montre que différentes combinaisons de paramètres peuvent être préférées en fonction du type de véhicule dans lequel elles sont utilisées.

Il existe certaines méthodes de construction permettant d'améliorer les performances des systèmes de suspension passive traditionnels. L'une de ces méthodes a été créée dans Mercedes-Benz Classe A en 2004 et s'appelle l'amortissement sélectif. Dans le sélectif.

Système d'amortissement une partie du débit d'huile est dirigée à travers un boîtier de soupape supplémentaire au-dessus du piston de l'amortisseur réel. À l'intérieur du boîtier, il y a un piston de commande qui le divise en deux zones. Lorsque l'amortisseur est soumis à de faibles mouvements le poussoir de commande est en position centrale et maintient ouvert un conduit de dérivation qui permet à une partie du débit d'huile de passer à travers le tourillon de piston. Cette huile doit passer la valve d'amortissement, réduisant la résistance globale de l'amortisseur. Ce produit des caractéristiques d'amortisseur "plus souples" qui augmentent le confort en particulier lorsque vous conduisez normalement mais sur des routes en mauvais état. Si l'amortisseur est soumis à des mouvements plus brusques - par exemple lors de virages à grande vitesse ou pendant manœuvres d'évitement - l'huile pousse le piston de commande dans le boîtier de la vanne vers le haut ou vers le bas, fermant

automatiquement le conduit de dérivation. En conséquence, l'amortissement complet L'effet devient disponible et le véhicule est stabilisé au maximum.

La mise en œuvre du système d'amortissement sélectif ne nécessitant que des mesures constructives, le système est fiable, simple et économique. Cependant, pour obtenir des résultats encore meilleurs, des systèmes semi-actifs et actifs sont nécessaires. Ils sont discutés ensuite [8].

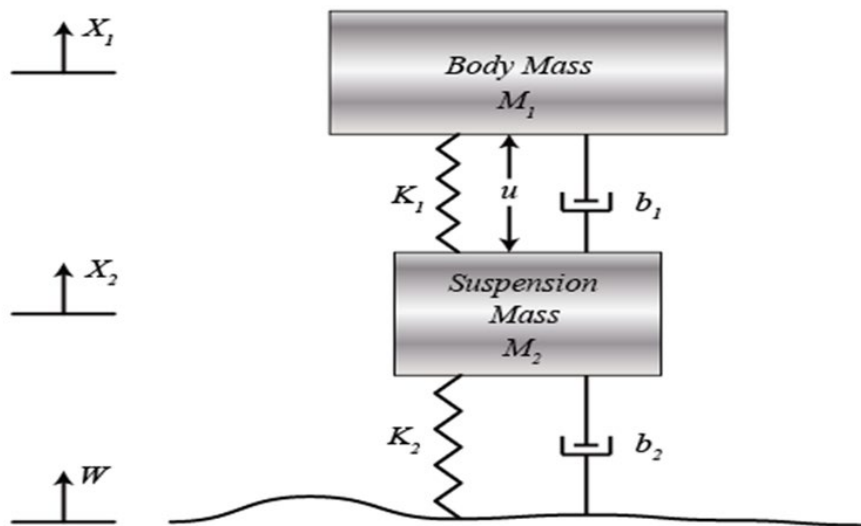


Figure I.5 : Modèle quart de véhicule simplifié passive à Système de suspension.

I.3. Modèles de véhicule

I.3.1. Modèle quart de véhicule

Un quart de la véhicule est divisé en deux parties, à savoir passive et active :

I.3.1.1. Passive

La majorité des articles traitant des suspensions actives utilisent un modèle de quart de véhicule avec deux degrés de liberté (DDL) [11-16] comme illustré à la figure

6. Dans ce cas nous posons l'hypothèse d'un mouvement vertical du véhicule. La simplicité de ce modèle en facilite l'optimisation et l'analyse.

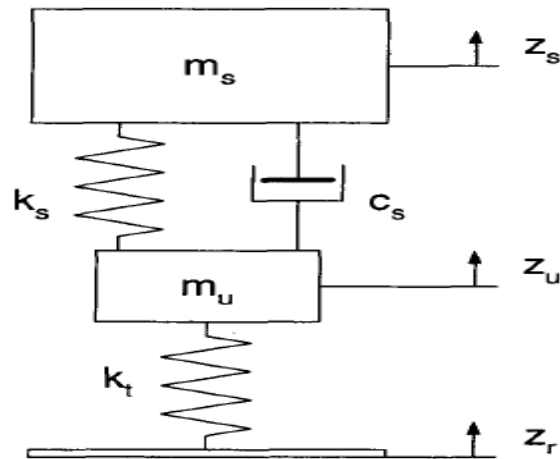


Figure I.6 : Modèle passive.

L'entrée du système est le mouvement vertical de la route sous le pneu Z_p . Le modèle est composé de deux masses distinctes. La masse non-suspendue m_u représente la masse du pneu, de la jante, du porte-moyeu et la moitié des bras de suspension. La masse suspendue m_s représente la masse du châssis supportée par la roue en question. Le pneu est modélisé par un ressort linéaire de constante k_t situé entre la masse non-suspendue et la route.

L'amortissement du pneu est considéré comme négligeable. La suspension proprement dite est composée d'un ressort en parallèle avec un amortisseur linéaire de constante k_s et c_s situés entre la masse suspendue et non-suspendue. La littérature contient plusieurs exemples valeurs pour les composantes du modèle [17].

I.3.1.2. Active

Ce modèle est semblable au modèle passif mais inclut un actionneur tel qu'illustré à la figure 7.

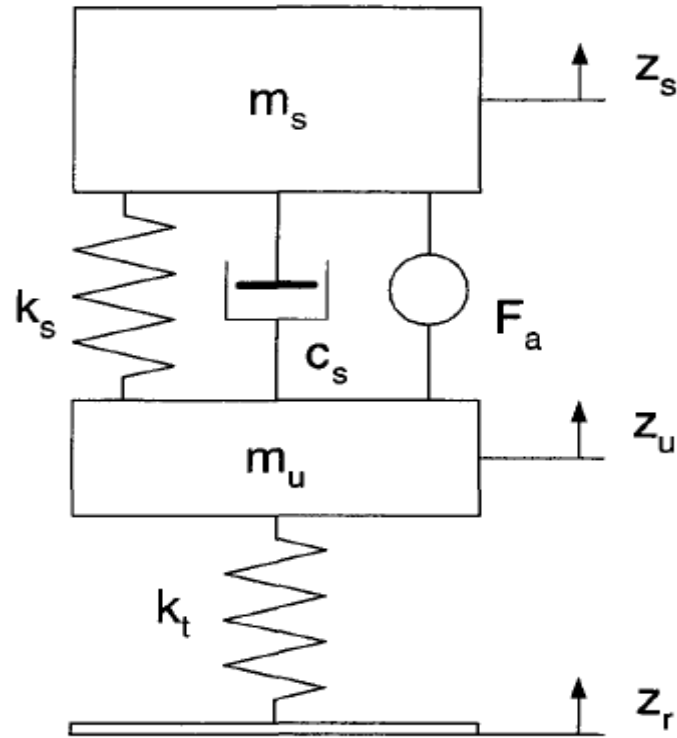


Figure I.7 : Modèle quart de véhicule à 2 DDL

L'actionneur applique une force F_a entre les masses suspendues et non suspendues. Pour formuler la dynamique du système en fonction de variable d'état, nous débutons par définir le vecteur x .

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_s - z_u \\
 x_2 &= \frac{d(z_s)}{dt} \\
 x_3 &= z_u - z_r \\
 x_4 &= \frac{d(z_u)}{dt}
 \end{aligned} \tag{I.1}$$

Les forces des ressorts et de l'amortisseur sont données par

$$\begin{aligned}
 F_{k_s} &= -k_s x_1 \\
 F_{c_s} &= -c_s (x_2 - x_1) \\
 F_{k_t} &= -k_t x_3
 \end{aligned} \tag{I.2}$$

Les équations sont obtenues en additionnant les forces appliquées sur les masses suspendues et non suspendues.

$$\sum F_{ms} = F_{ks} + F_{cs} + F_a = m_s d^2(z_s)/dt^2 \quad (I.3)$$

$$\sum F_{us} = F_{kt} - F_{ks} - F_a = m_u d^2(z_u)/dt^2 \quad (I.4)$$

Par la suite, les équations sont décomposées en fonction du vecteur d'état x , de l'entrée contrôlée F_a et de l'entrée non contrôlée Z_r . Le résultat est un système de 4 équations de la forme :

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][F_a] + [L][Z_r] \quad (I.5)$$

I.3.2. Modèle 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. 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 droite. 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 8 schématise le modèle demi-véhicule [16].

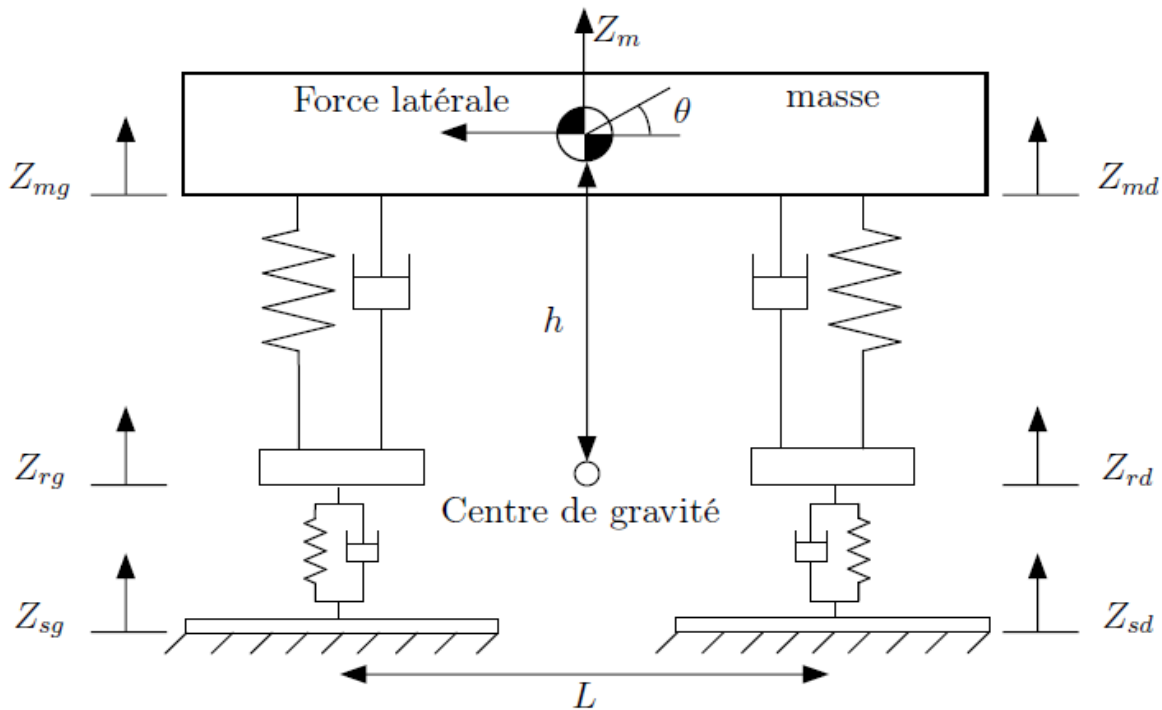


Figure I.8 : Modèle de suspension représenté par un demi-véhicule latéral à 4 degrés de liberté

I.3.3. Modèle 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. Le modèle complet à 7 degrés de liberté, présenté sur la figure 9, 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. Ce modèle peut être complété en tenant compte des 3 déplacements (vertical, longitudinal et latéral) et des 3 rotations (roulis, tangage et lacet) possibles pour chaque élément. De plus, on peut aussi compléter ce modèle par l'ajout de la suspension du moteur et celui des sièges des passagers. Cependant ces modèles deviennent rapidement très complexes à utiliser pour la synthèse et la compréhension

du fonctionnement des suspensions, à cause des non-linéarités, des couplages entre les différents mouvements et de la taille des systèmes étudiés.

A ce stade, nous avons introduit les notions générales relatives au domaine des suspensions automobiles. Nous avons présenté les principales architectures et modèles de représentation des suspensions d'un véhicule sous un angle mécanique. Dans ce qui suit nous nous intéresserons à une autre classification des suspensions selon leur principe de fonctionnement et selon la manière une autre classification des suspensions selon leur principe de fonctionnement et selon la manière dont elles sont contrôlées. De manière générale, les modèles destinés à la synthèse des lois de dont elles sont contrôlées. De manière générale, les modèles destinés à la synthèse des lois de commande ne prendront en compte que le modèle de quart de véhicule simplifié. On commence toujours par ce modèle pour aller vers des modèles plus complexes. Ce choix de restreindre l'étude sur le cas d'un quart de véhicule sera appliqué dans le reste du travail présenté dans ce mémoire [19].

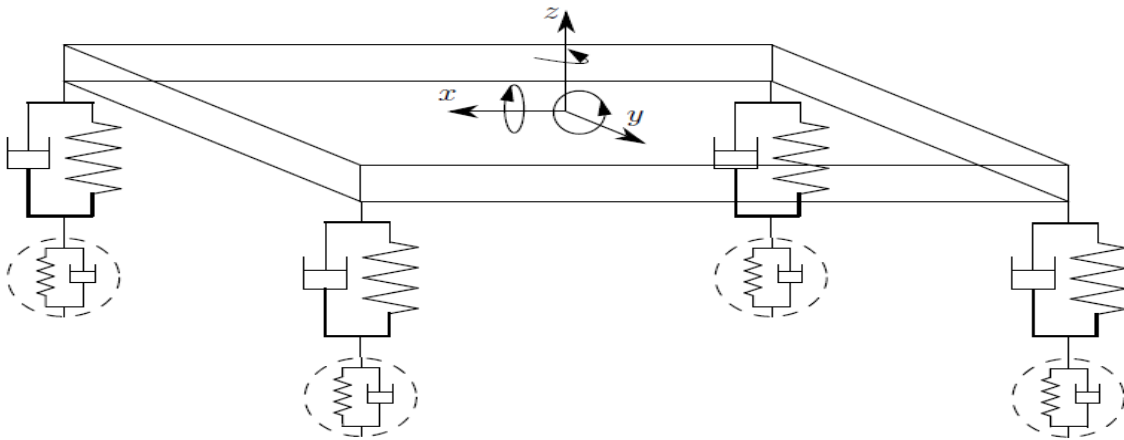


Figure I.9 : Modèle de véhicule complet

I.4. Comparaison des performances des trois types de suspension

Type de 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
L'élément d'amortissement	Rien	Automatique Electronique Hydraulique	Electronique Magnétique Hydraulique
L'action principale	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.1 : Comparaison types de suspension

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les types de suspension de voiture, qui sont de trois types (suspension active, suspension semi-active et suspension passive). Nous avons également étudié les modèles de véhicules et leurs types, qui sont (Modèle quart de véhicule ou mono-roue et modèle demi-véhicule, modèle véhicule complet ou 3D), et dans la dernière partie nous avons comparé les performances des types de suspension de voiture.

Chapitre II

II.1. Introduction

La logique floue ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché [20].

La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou processus particulier de façon linguistique, puis de représenter ce phénomène par un faible nombre de règles. Les connaissances dans un système flou sont contenues dans les règles et dans les ensembles flous, qui contiennent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question [21].

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble flou soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle [22].

La définition de Zadeh

“La logique floue est déterminée comme un ensemble de principes mathématiques pour la représentation des connaissances basés sur les degrés d'appartenance plutôt que sur l'appartenance nette à la logique binaire classique”.

II.2. Éléments d'un ensemble flou :

- Un système à logique floue comprend :

- Des variables d'E/S,
- Des labels qui représentent les valeurs floues de chaque variable.
- Des fonctions qui définissent le degré d'appartenance des valeurs des variables aux labels.

- Une valeur mesurée peut appartenir à plusieurs labels, avec des degrés divers.

II.3. Les opérateurs flous

Afin de pouvoir manipuler aisément les ensembles flous, nous redéfinissons les opérateurs de la théorie des ensembles classiques afin de les adapter aux fonctions d'appartenance propres à la logique floue permettant des valeurs strictement entre 0 et 1.

Contrairement aux définitions des propriétés des ensembles flous qui sont toujours les mêmes, la définition des opérateurs sur les ensembles flous est choisie, à l'instar des fonctions d'appartenance. Voici les deux ensembles d'opérateurs pour le complément (NON), l'intersection (ET) et l'union (OU) utilisés le plus couramment :

Dénomination	Intersection ET : $\mu_{A \cap B}(x)$	Réunion OU : $\mu_{A \cup B}(x)$	Complément NON : $\mu_{\bar{A}}(x)$
Opérateurs de Zadeh MIN/MAX	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabiliste PROD/PROBOR	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

Tableau II.1: Opérateurs flous.

Avec les définitions usuelles des opérateurs flous, nous retrouvons toujours les propriétés de commutativité, distributivité et associativité des opérateurs classiques. Ce pendant, relevons deux exceptions notable:

- En logique ou, le principe du tiers exclu est contredit : $A \cup \bar{A} \neq X$ autrement dit $\mu_{A \cup \bar{A}}(x) \neq 1$.
- En logique floue, un élément peut appartenir à A et non A en même temps : $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$ autrement dit $\mu_{A \cap \bar{A}} \neq 0$. Notons que ces éléments correspondent à l'ensemble $\text{supp}(A) - \text{noy}(A)$ [23].

II.4. Systèmes d'Inférence flous

Un Système d'Inférence Floue (SIF) a comme but de transformer les données d'entrée en données de sortie à partir de l'évaluation d'un ensemble des règles. Les entrées sont issues du processus de fuzzification et l'ensemble de règles normalement sont définies par le savoir faire de l'expert.

Un SIF est constitué de trois étapes (voir la Figure II.2) :

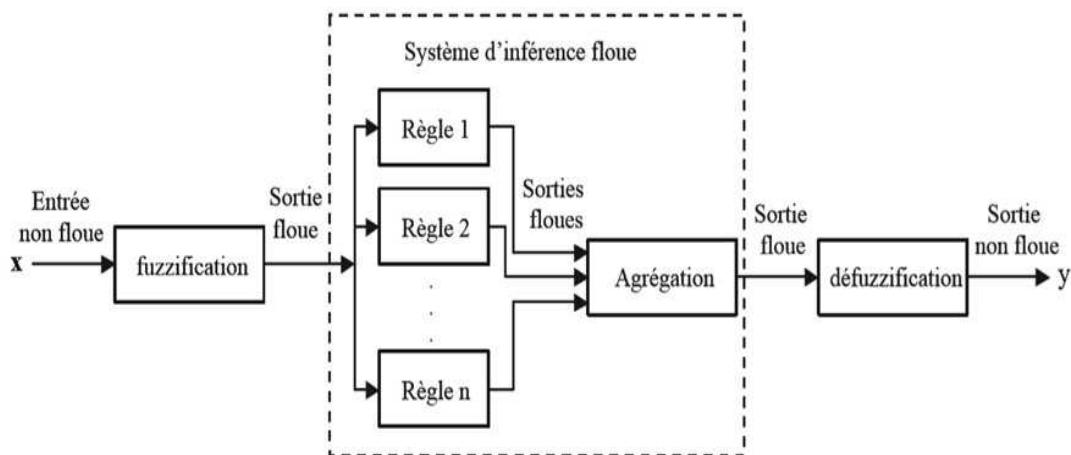


Figure II.1: Système d'Inférence Floue (SIF)

II.4.1. Fuzzification

Consiste à caractériser les variables linguistiques utilisées dans le système. Il s'agit donc d'une transformation des entrées réelles en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Cet espace de représentation est normalement un sous-ensemble flou. Durant l'étape de la fuzzification, chaque variable d'entrée et de sortie est associée à des sous-ensembles flous.

II.4.2. Inférence

Consiste à utiliser le moteur d'inférence, qui est un mécanisme permettant de condenser l'information d'un système à travers d'un ensemble de règles définies pour la représentation d'un problème quelconque. Chaque règle délivre une conclusion partielle qui est ensuite agrégée aux

autres règles pour fournir une conclusion (agrégation). Les règles constituent le système d'inférence floue.

II.4.3. Défuzzification

Consiste à caractériser les variables linguistiques utilisées dans le système. Il s'agit donc d'une transformation des entrées réelles en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Cet espace de représentation est normalement un sous-ensemble flou. Durant l'étape de la fuzzification, chaque variable d'entrée et de sortie est associée à des sous-ensembles flous.

II.5. Les avantages et les inconvénients de la logique floue

II.5.1. Les avantages

- Robustesse vis à vis des incertitudes.
- Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.
- Facilité d'implantation.
- Possibilité d'intégration du savoir de l'expert.
- Solution de problèmes multi variables complexes.

II.5.2. Les inconvénients

- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse. (Difficultés de certification dans le transport, espace).
- Réglage empirique.
- Performances en boucle fermée dépendent de l'expertise [24].

II.6. La commande PID

Un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (contrôleur PID) est un mécanisme de retour de boucle de contrôle (contrôleur) largement utilisé dans les systèmes de contrôle industriels. Un régulateur PID calcule une valeur d'erreur comme la différence entre une grandeur de procédé mesurée et un point de consigne souhaité. Le contrôleur tente de minimiser l'erreur en ajustant le processus en utilisant une variable manipulée.

L'algorithme du contrôleur PID implique trois paramètres constants distincts, et est donc parfois appelé contrôle à trois termes: les valeurs proportionnelles, intégrales et dérivées, notées P, I et D. En termes simples, ces valeurs peuvent être interprétées en termes de temps: P dépend de l'erreur actuelle, I de l'accumulation des erreurs passées et D est une prédiction des erreurs futures, basée sur le taux de changement actuel. La somme pondérée de ces trois actions est utilisée pour ajuster le processus via un élément de commande tel que la position d'une vanne de commande, un registre ou la puissance fournie à un élément chauffant.

Du moment que les régulateurs continus PI, PD, PID, ont reçu une grande application dans l'industrie. Le régulateur PID est certainement l'un des plus importants en raison de son universalité. Il est à noter que les régulateurs PID sont les plus répondus dans l'industrie et sont même utilisés, en combinaison avec des régulateurs flous.

II.7. Schéma fonctionnel du contrôleur PID

Un système en boucle fermée comme un contrôleur PID comprend un système de contrôle de rétroaction. Ce système évalue la variable de rétroaction en utilisant un point fixe pour générer un signal d'erreur. Sur cette base, il modifie la sortie du système. Cette procédure se poursuivra jusqu'à ce que l'erreur atteigne zéro, sinon la valeur de la variable de retour devient équivalente à un point fixe.

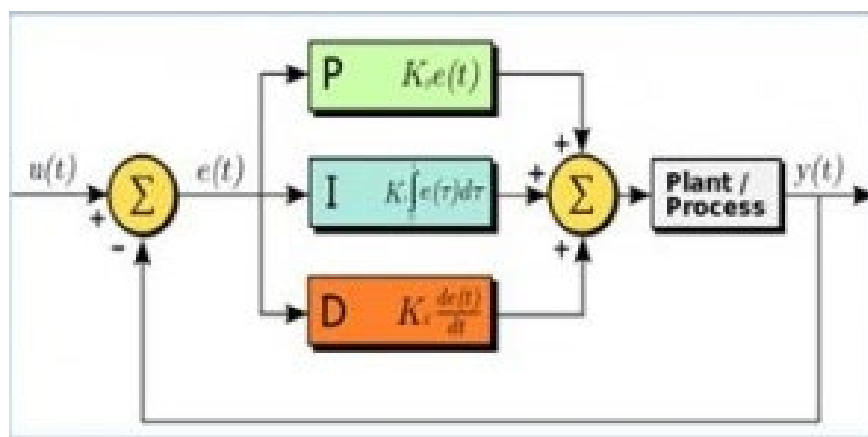


Figure II.2 : Configuration du système de contrôle de base.

Ce contrôleur fournit de bons résultats par rapport au contrôleur de type ON / OFF. Dans le contrôleur de type ON / OFF, il suffit d'obtenir deux conditions pour gérer le système. Une fois que la valeur de processus est inférieure au point fixe, elle s'allumera. De même, il s'éteindra une fois que la valeur est supérieure à une valeur fixe. La sortie n'est pas stable dans ce type de contrôleur et elle oscillera fréquemment dans la région du point fixe. Cependant, ce contrôleur est plus stable et précis que le contrôleur de type ON / OFF [24].

II.8. Caractéristiques dynamiques régulateur PID

- Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable commandée à sa consigne.
- L'influence des perturbations doit être minimale.
- Les réponses à des variations de consigne doivent être rapides et douces.
- Une action de commande excessive doit être évitée (la variable de commande $u(t)$ ne doit pas être trop sollicitée).
- Le système en boucle fermée doit être stable asymptotiquement et présenter une performance satisfaisante dans une large gamme de fréquences [25].

II.9. Les différentes structures du PID

Il existe plusieurs possibilités pour relier les unités P, I et D. Ces structures sont fonctionnellement équivalentes et il est facile de convertir les coefficients utilisés dans l'une d'elles en une autre. Les possibilités les plus courantes :

- La structure série :

La transformée de Laplace de la loi de commande est de la forme :

$$c(p) = e(p).Kp. \left[Ki. \frac{1}{p} \right]. [Kd.p]$$



Figure II.3 : La structure série

- **La structure parallèle :**

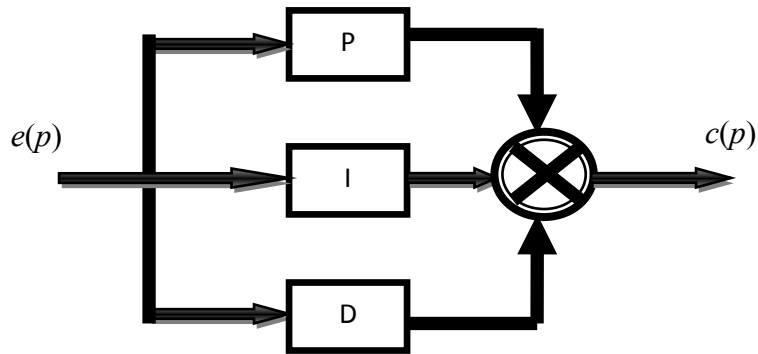


Figure II.4 : La structure parallèle.

La loi de commande est de la forme :

$$C(t) = Kp.e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt}$$

Soit d'après la transformée de Laplace :

$$C(P) = Kp.e(p) + Ki \cdot \frac{e(p)}{p} + Kd.p.e(p)$$

- **La structure mixte :**

Soit d'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

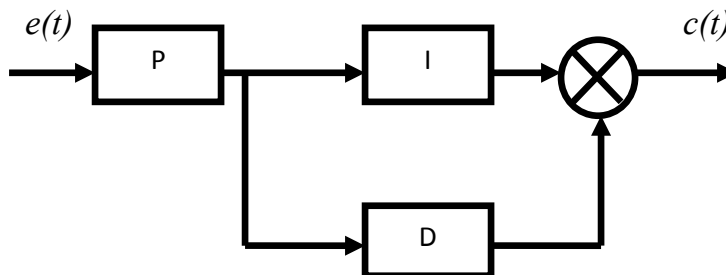


Figure II.5 : La structure mixte

$$C(p) = Kp.e(p) \cdot [Ki \cdot \frac{1}{p} + Kd \cdot p]$$

II.10. Régulation PID

II.10.1. Proportionnel

Dans le cas d'un système proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t)$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \cdot \varepsilon(p).$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci réagisse plus rapidement aux changements de consignes. Plus la valeur de K_p est grande, plus la réponse l'est aussi. En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un K_p démesuré le système peut même diverger.

Si l'on prend l'exemple d'une voiture qui dérive, la régulation proportionnelle consiste à contrebraquer rapidement pour rétablir la voiture.

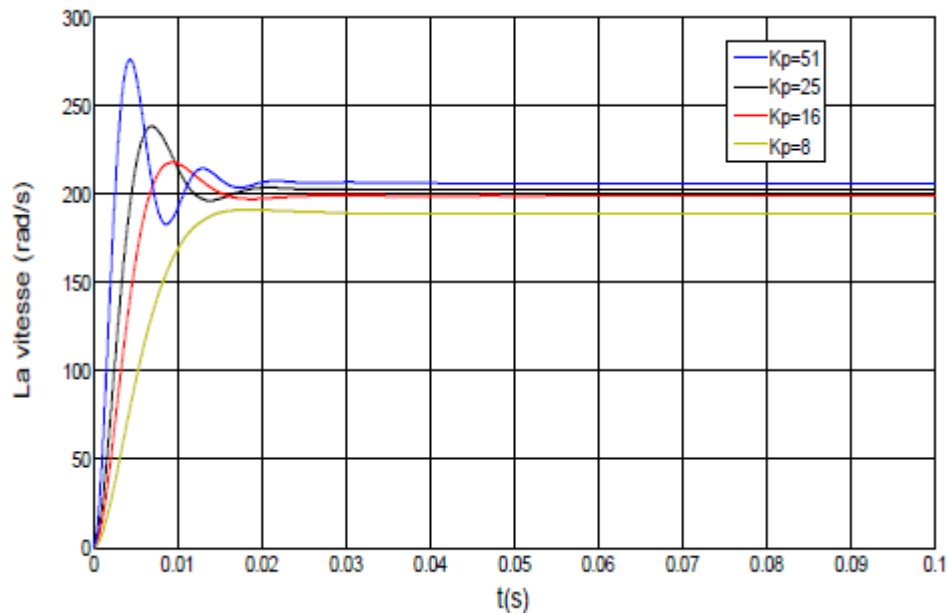


Figure II.6: Modélisation de la réponse à un échelon dans un asservissement en position.

II.10.2. Intégré

Au système proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI.

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p}$$

Pourquoi a-t-on besoin de rajouter cette fonctionnalité a notre organe de système ?

Et bien, lors d'un simple système proportionnel, il subsiste une erreur statique. Lorsque le système s'approche de sa consigne, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur. Le terme intégral permet ainsi de compenser l'erreur statique et fournit, par conséquent, un système plus stable en régime permanent. Plus K_i est élevé, plus l'erreur statique est corrigée. Pour reprendre l'exemple de la voiture qui dérive, le terme intégral consiste a rajouter un petit coup de contre braquage afin de se rétablir correctement.

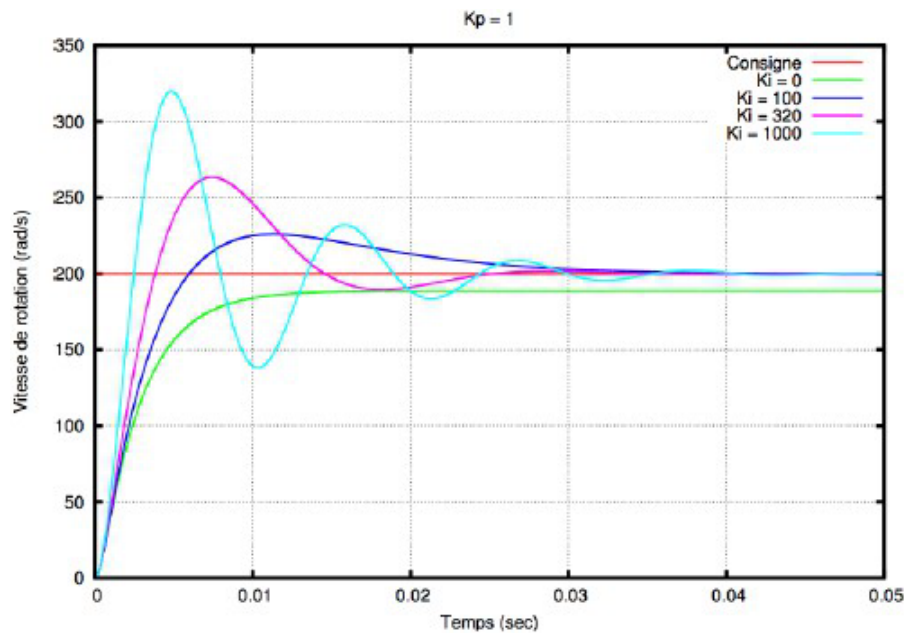


Figure II.7 : Modélisation de la réponse a un échelon dans un asservissement en vitesse.

II.10.3. Dérivé

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore rajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et à le multiplier lui aussi par une constante..

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau + k_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) = \varepsilon(p) \cdot [K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p]$$

Nous avons besoin d'un terme dérive car le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, ce qui n'est pas toujours très souhaitable (exemple d'inversion de polarité dans le cas de moteurs électriques). Le terme dérive permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide.

Toujours avec l'exemple de la voiture, le terme dérive représente le petit contre braquage dans le sens opposé de l'ajustement pour stabiliser la voiture lorsqu'elle s'approche du point qu'elle voulait rejoindre [27].

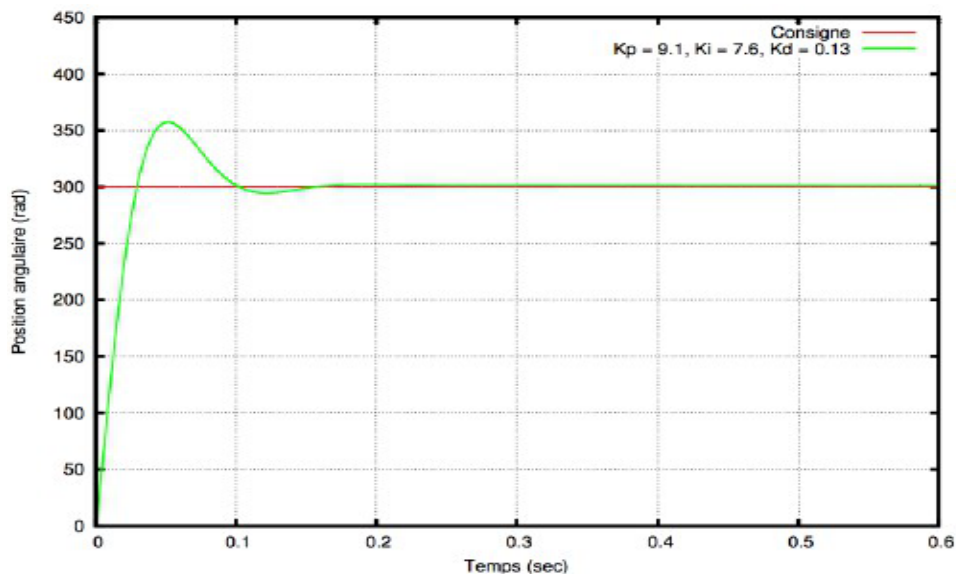


Figure II.8 : Modélisation de la réponse à un échelon dans un asservissement en vitesse.

II.11. Avantages et Inconvénients du régulateur PID

Malgré son utilisation sur le niveau l'industriel, cependant que le régulateur PID a quelques avantages et inconvénients :

Correcteurs	Avantages	Inconvénients
P	Simplicité, meilleur précision	Risque d'une instabilité si $k_c \gg 1$
PI	Implicité, Erreur, statique nulle	Système parfois lent en BF
PID	Très utilisé en industrie Action PI+PID	Réglage des paramètres plus difficile

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients d'un régulateur PID [26]

II.12. Commande PID floue

Un système de commande PID flou, Il s'agit d'un contrôle hybride extrait de (contrôle PID et contrôle flou) qui régule le comportement d'autres appareils ou systèmes pour produire le rendement souhaité. Tant d'algorithmes de contrôle dépendent de modèles mathématiques de systèmes dynamiques pour décrire la dynamique du système de manière précise et déterministe.

Le contrôle flou est une méthode de contrôle basée sur la théorie des ensembles flous, des variables de langage flou et un raisonnement de logique floue. Il couvre une large application dans divers domaines du contrôle et de l'automatisation. En tant que combinaison de contrôle flou et de contrôle PID, le contrôle PID flou est une approche de contrôle populaire. Bien que le contrôle flou et le contrôle PID flou aient été largement utilisés, on ne sait pas comment le contrôle flou fonctionne par rapport au contrôle PID flou [29].

Les contrôleurs PID Floue peuvent être utilisés à la place du contrôleur PID linéaire dans toutes les applications de système de contrôle classiques ou modernes. Ils convertissent l'erreur entre les applications de système de contrôle mesurées ou

modernes. Ils convertissent l'erreur entre l'actionneur mesuré ou ϵ d'un processus. Dans la conception pratique, il est important d'avoir des informations sur leurs caractéristiques de transfert d'entrée-sortie équivalentes [30].

II.13. Etude analytique de la commande PID floue

Le but d'un contrôleur est d'atteindre ou de maintenir un processus dans un état spécifique, en surveillant un ensemble de variables et en sélectionnant les actions de contrôle adéquates.

Le contrôleur PID Floue fonctionne comme son homonyme classique, mais les variables d'entrée et l'action de contrôle sont donnés en termes linguistiques. Le développement analytique des contrôleurs flous nous permet d'expliquer l'influence de chaque paramètre de réglage sur la réponse du système, ainsi que de les comparer au conventionnel pour obtenir des résultats généraux.

L'incorporation du terme dérivé fournit une nouvelle action de contrôle au contrôleur. Dans le cas flou, l'augmentation du nombre de variables d'entrée entraîne une augmentation de la dimension de la table de règles et, par conséquent, de la complexité du système; cela rend sa mise en œuvre plus compliquée et peut rendre difficile son étude analytique. Pour cette raison, un PI est généralement utilisé à la place d'un PID dans la plupart des applications de contrôle floue [31].

II.14. Structure de la commande PID floue

La structure du PID Floue est illustrée à la figure (II.10).

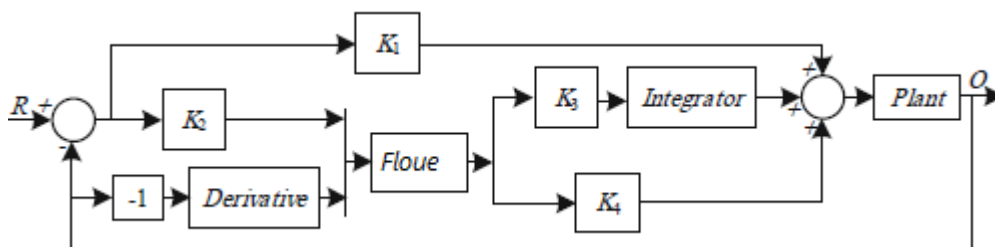


Figure II.9 : Structure du contrôleur PID floue.

Ce contrôleur a une structure simple comprenant un intégrateur, un dérivé, cinq gains de contrôle et une interface floue [32]. La relation entre les signaux d'entrée et de sortie du système flou est définie sur la base de la fonction et des règles d'appartenance floue. La fonction d'appartenance et les règles floues du contrôleur PID Floue sont représentées sur la figure II.2 et le tableau II.1, respectivement [33].

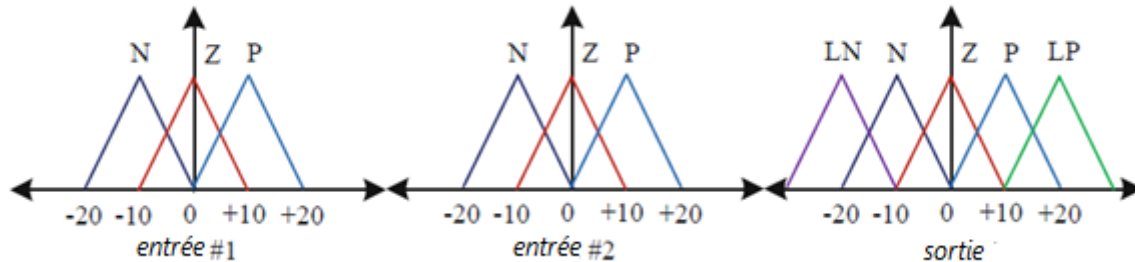


Figure II.10 : Entrée/Sortie des contrôleurs PID floue.

		Entrée #2		
		N	Z	P
Entrée #1	N	LN	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	LP

Tableau II.3 : Règles floues du système d'interface floue du contrôleur PID floue.

Chaque entrée a trois fonctions d'appartenance de type trimf et la sortie a cinq fonctions d'appartenance de type trimf qui sont liées par neuf règles floues qui sont obtenues en fonction des connaissances d'ingénierie et du comportement du système [32-34]. Il convient de noter que pour obtenir la meilleure propriété dynamique du contrôleur PID Floue, ce sont quatre gains de contrôle, c'est-à-dire que K_1 à K_4 doivent être déterminés avec soin [33].

II.15. Types de contrôleurs PID flous

Les contrôleurs PID flous peuvent être construits en utilisant deux entrées ou trois entrées. Par conséquent, les contrôleurs PID flous DA peuvent être classés en trois catégories:

- Contrôleurs PID floue à entrée unique.
- Deux contrôleurs PID floue d'entrée.
- Trois contrôleurs PID floue d'entrée.

II.15.1. Contrôleurs PID floue à entrée unique

Le signal d'erreur est l'élément de commande essentiel et fondamental de la commande PID. En utilisant l'erreur comme seule entrée, un contrôleur PID flou d'entrée unique peut être formé [36]. Il s'agit simplement d'un mappage non linéaire d'erreur en action proportionnelle floue en cascade sur un contrôleur PID conventionnel [37].

II.15.2. Deux contrôleurs PID floue d'entrée

Si deux entrées sont utilisées pour former un contrôleur PID flou, on peut obtenir un contrôleur PD flou ou PI flou. Par exemple, si les entrées sont choisies comme erreur (e) et dérivée (ou chance) d'erreur (\dot{e}), alors on se retrouve avec un contrôleur PD flou comme le montre la figure (II.14).



Figure II.11 : Structure de contrôleur de type PD floue.

Lorsque les entrées sont choisies comme erreur (e) et l'intégrale (ou la somme) de l'erreur, alors le contrôleur devient un contrôleur PI flou de forme absolue. Si les entrées sont choisies comme erreur (e) et dérivée (ou chance) d'erreur (\dot{e}), alors un contrôleur PI flou de forme

incrémentielle peut être obtenu, mais la sortie est obtenue en tant que dérivée (ou chance) du signal de commande comme indiqué sur la figure (II.15) [37,38].

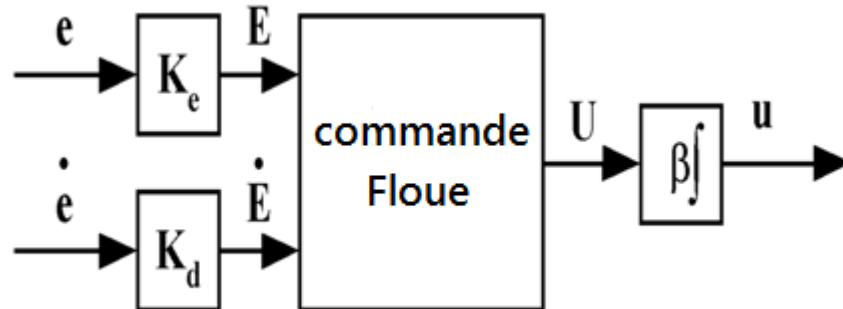


Figure II.12 : Structure de contrôleur de type PI floue.

II.15.3. Trois contrôleurs PID floue d'entrée

Un contrôleur PID flou peut être construit en introduisant la troisième information en plus de l'erreur et de la dérivée (ou du changement) d'erreur [39, 40]. Lorsque cette troisième entrée est choisie comme intégrale (ou somme) de l'erreur, un contrôleur PID flou de forme absolue avec une base de règles 3D, qui est donnée sur la figure 10, peut être obtenu. Afin d'obtenir un contrôleur PID flou de forme incrémentielle, la troisième entrée doit être considérée comme le taux de variation de l'erreur [41].

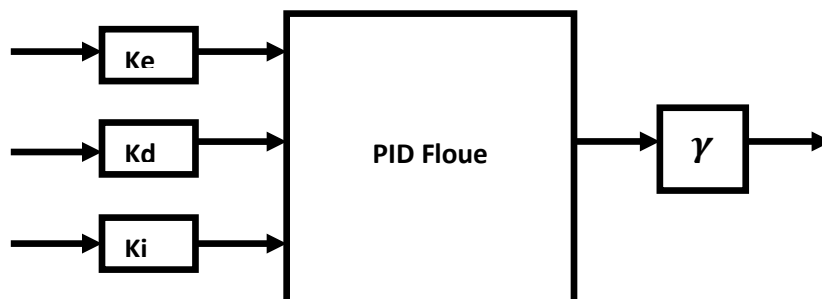


Figure II.13 : Structure de contrôleur de type PID floue avec base de règles 3-D.

Le contrôleur PID flou avec base de règles 3D est difficile à construire pour les raisons suivantes:

- Dans le cas de l'utilisation du taux de variation de l'erreur, un expert humain peut difficilement sentir la troisième dimension de l'information, par exemple, l'accélération en plus de la position et de la vitesse dans un système de contrôle de mouvement, et il est donc difficile d'obtenir les règles de contrôle.
- Dans le cas de l'utilisation de la somme des erreurs, il est difficile de quantifier ses valeurs linguistiques car une installation différente a besoin d'un gain intégral et d'une valeur en régime permanent différents de la somme des erreurs.
- Une base de règles 3-D peut être très complexe lorsque le nombre de quantifications de chaque dimension augmente, et dans cette situation, le numéro de règle de contrôle augmente cubique ment avec le nombre de quantifications [37, 41].

II.18. Conclusion

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des types de contrôle à savoir la commande PID, commande floue et commande PID floue et nous avons expliqué également chacun de ces types et comment ils fonctionnent.

Chapitre III

III.1. Introduction

La fonction principale des systèmes de suspension de véhicule est de fournir une isolation efficace contre les irrégularités de la surface de la route, la stabilité et le contrôle directionnel pendant les manœuvres de conduite, sans perte de confort de conduite et de soutien du véhicule. Les paramètres de suspension sont généralement fixes, étant choisis pour atteindre un certain niveau de compromis entre tenue de route, port de charge et confort.

Un système de suspension active avec une force de commande supplémentaire pour supprimer les oscillations est l'un des principaux domaines de développement dans l'industrie automobile récente. La suspension active avec sa force d'actionnement supplémentaire permet de maintenir le bon contact entre le pneu et la route, et de réduire l'oscillation de la carrosserie du véhicule induite par la variation de la surface de la route. Il atteint ces capacités car il peut adapter ses paramètres en fonction des conditions de fonctionnement et a la capacité de stocker/dissiper et d'introduire de l'énergie dans le système. Le contrôle actif des suspensions de véhicules fait l'objet de nombreuses enquêtes [40].

III.2. Modèle de suspension active

Dans ce chapitre, on considère 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 figure (III.1). Les masses de la carrosserie du véhicule et la roue sont respectivement de parties désignées de la manière m_c (masse suspendu) et m_r (masse non suspendu). Le déplacement respectivement exprime 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.

Par conséquent, les équations de mouvement, pour le modèle de suspension active 1/4 de véhicule sont données par :

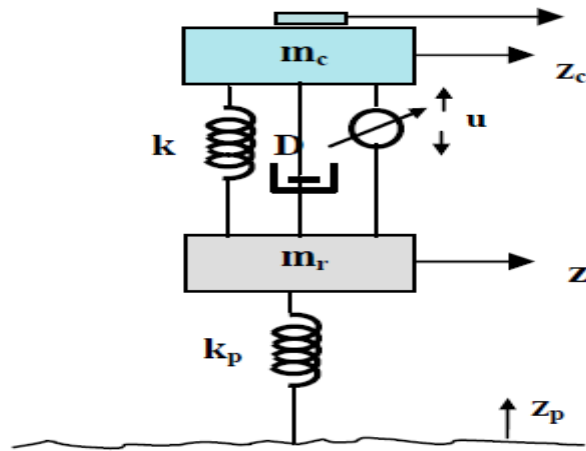


Figure III.1: Modèle quart de véhicule de deux degré de liberté

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

où c_1, c_2 et c_3 sont de constantes positives (voir le tableau III.1) :

Coefficients	m_c (kg)	m_r (kg)	K (N/m)	k_p (N/m)	D (N/m)
Values	229	59	16812	190000	1000
Coefficients	c_1	c_2	c_3		
Values	1	1	6		

Tableau III.1 : Paramètres du modèle quart de véhicule

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

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

On peut réécrire (III.1) sous la forme suivant

$$\begin{cases} \ddot{z}_c = \frac{1}{mc} [-Dc1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) - k(c2(z_c - z_r) + c3(z_c - z_r)^3) + u] \\ \ddot{z}_r = \frac{1}{mr} [-Dc1(\dot{z}_c - \dot{z}_r) - k(c2(z_c - z_r) + c3(z_c - z_r)^3) + kp(z_p - z_r) - u] \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$z_c(t) = x_1$: déplacement vertical du châssis.

$z_r(t) = x_2$: déplacement vertical de la roue.

x_p : perturbation provenant de la route

$\dot{z}_c(t) = x_3$ et $\dot{z}_r(t) = x_4$.

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{mc} [Dc1(x_3 - x_4) - k(c2(x_1 - x_2) + c3(x_1 - x_2)^3) + u] \quad (\text{III.3})$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{mr} [Dc1(x_3 - x_4) - k(c2(x_1 - x_2) + c3(x_1 - x_2)^3) + kp(z_p - x_2) - u]$$

III.3. Commande PID floue de la suspension active

III.3 1. Construction de la commande

Il existe différents types de contrôle par logique floue, selon les dispositifs de la commande industrielle, l'expert doit se doter d'un savoir faire technologique en terme d'analyse et d'expérience pour raisonner logiquement sur les règles floues. La tâche principale associée à cette étude est de montrer les performances de conception d'une commande PID auto-ajusté par un régulateur flou à deux entrées l'erreur et la variation de l'erreur, les trois sorties sont contrôlées en temps réel. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et des sorties incluent ces ensembles flous **NB** (Négative grand), **NM** (Négative moyen), **NS** (Négative petit), **ZE** (zéro environ), **PS** (Positive petit), **PM** (Positive moyen), **PB** (Positive grand) représentées sur les figures (III.2 et

III.3). Les règles floues du mécanisme d'inférence du régulateur flou sont de type Mamdani [39].

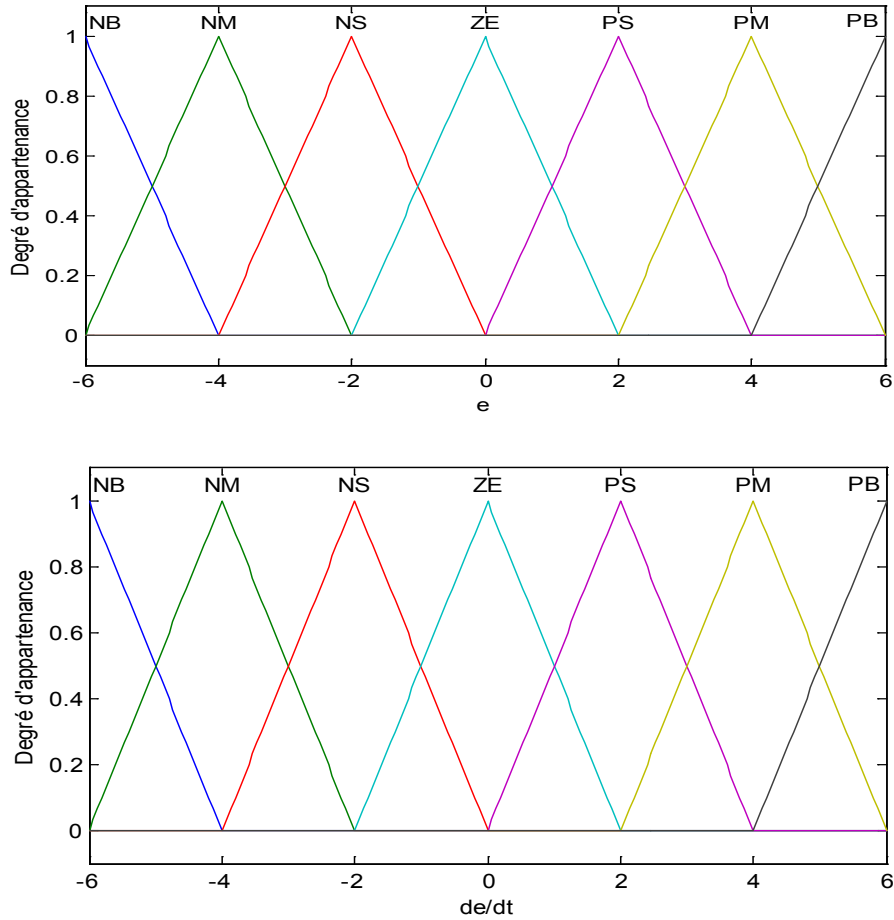


Figure III.2 : Fonctions d'appartenance des entrées e et ec

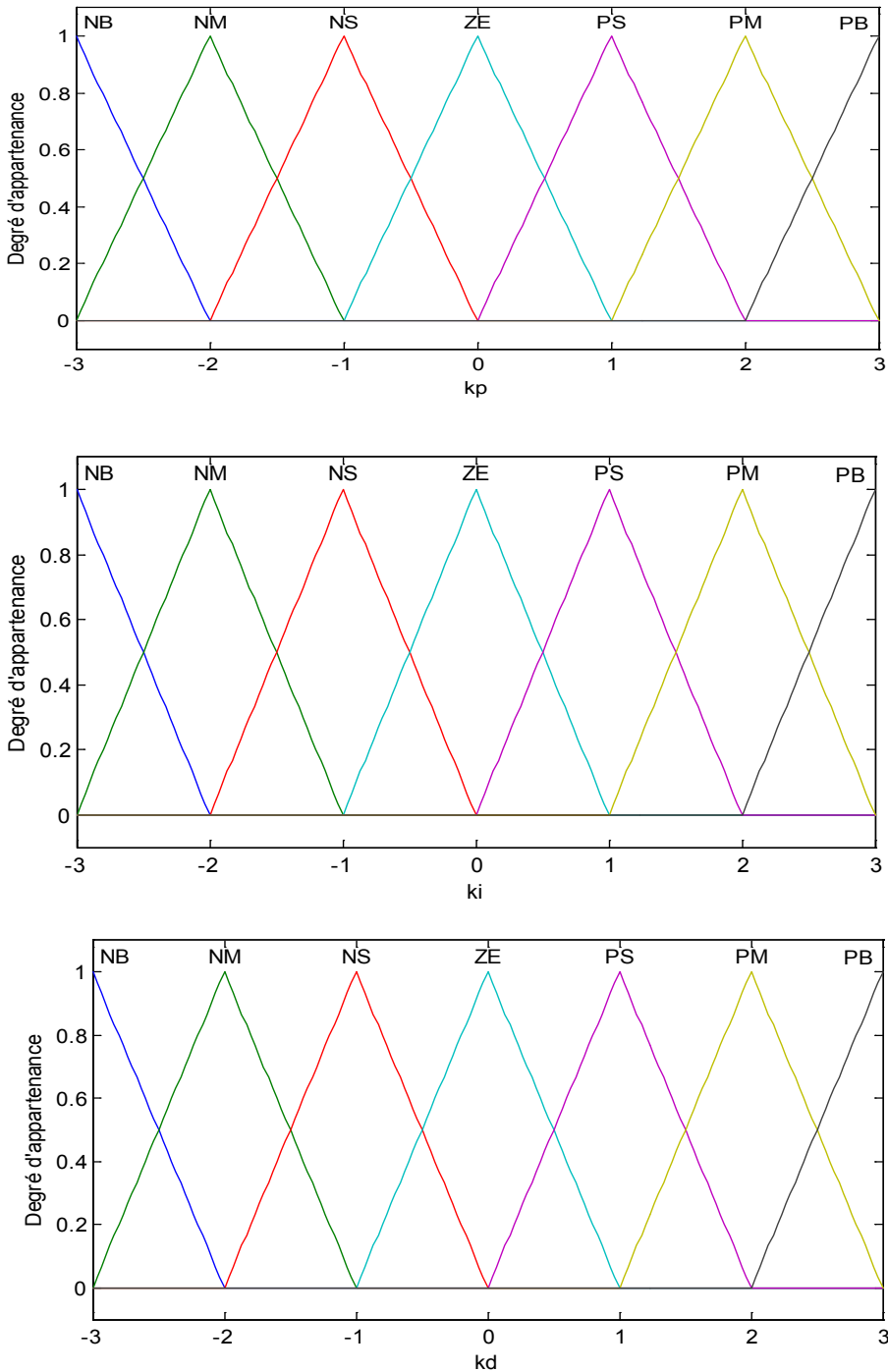


Figure III.3 : Fonctions d'appartenance des sorties k_p, k_i et k_d

Suite aux fonctions d'appartenance des variables d'entrées-sorties on définit la base de règles associée suivant le tableau suivant :

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	NM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

Tableau III.2 : Règles floues pour K_p

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

Tableau III.3 : Règles floues pour K_i

e \ de/dt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB
NM	NS	NS	NS	NS	ZE	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
PM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
PB	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	PB	PS

Tableau III.4 : Règles floues pour K_d

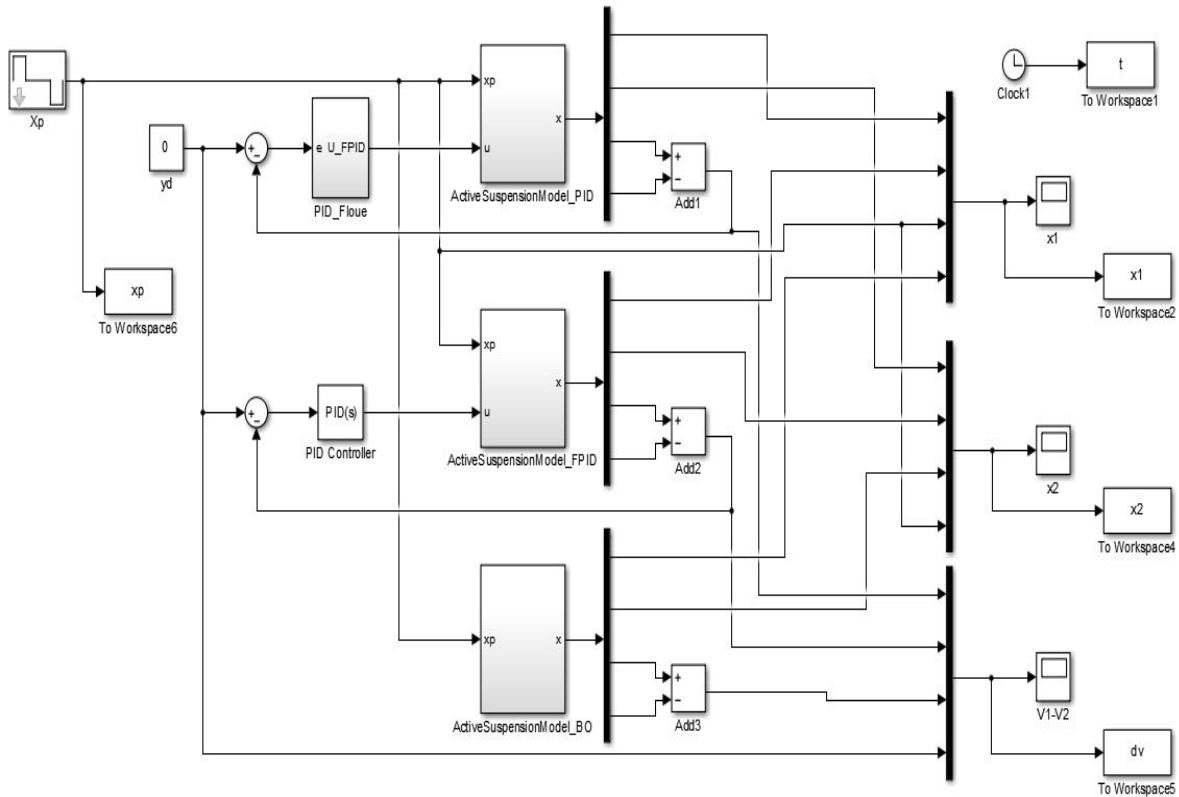


Figure III.4 : Commande de la suspension active (PID et FPID).

III.3.2. Résultats de simulation

Dans cette section, l'objectif de la commande est de stabiliser le système III.1 par l'application de la commande PID floue détaillée dans la section précédente, pour vérifier les performances de cette technique de commande nous utilisons deux types différents de perturbation représentent les perturbations provenant de la route (un carré figure (III.5) et autre sinusoïdale (figure III.9) pour la simulation. Les résultats de simulation seront comparés avec celle obtenues via l'application de la commande PID.

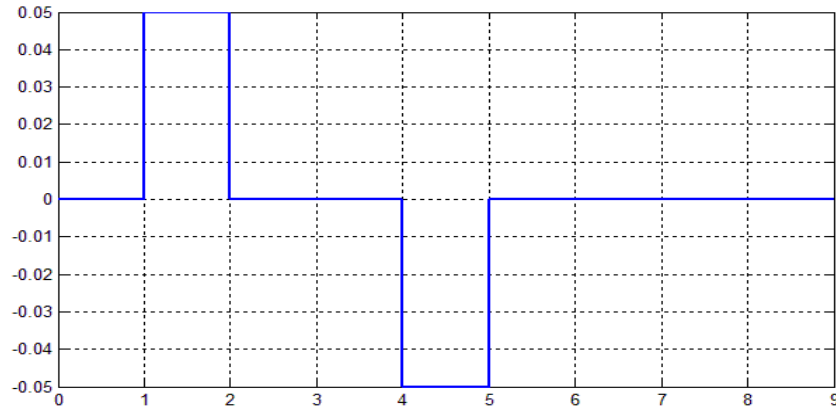


Figure III.5 : Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route)

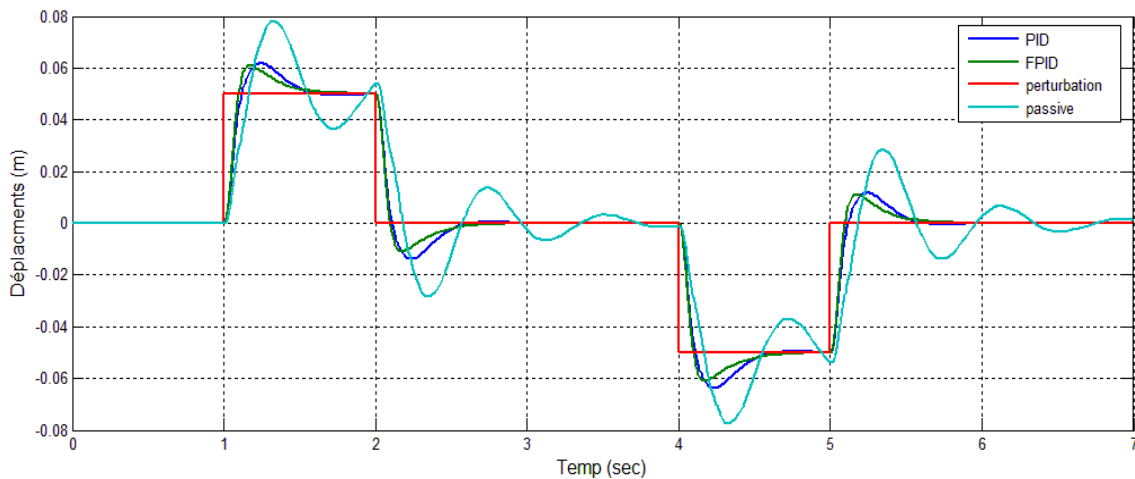


Figure III.6 : Déplacement vertical du châssis

Les figures III. 6 et III.10 présentent déplacement vertical du châssis du véhicule dans les deux cas considérés de la perturbation provenant de la route (un carré figure (III.5) et autre sinusoïdale (figure III.9), les figures III.6 et III.11 représentent le déplacement relatif du système de suspension (Déplacement vertical du châssis – le déplacement vertical de la roue) et les figures III.8 et III.12 représentent la vitesse relatif du système de suspension (Vitesse de déplacement vertical du châssis – la vitesse de déplacement vertical de la roue).

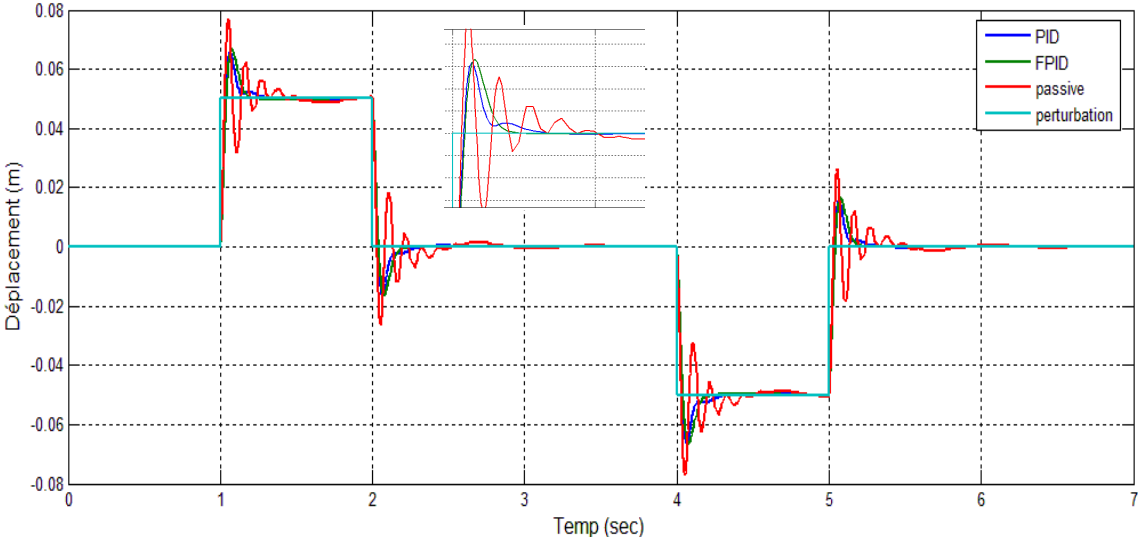


Figure III.7 : Déplacement relatif du système de suspension.

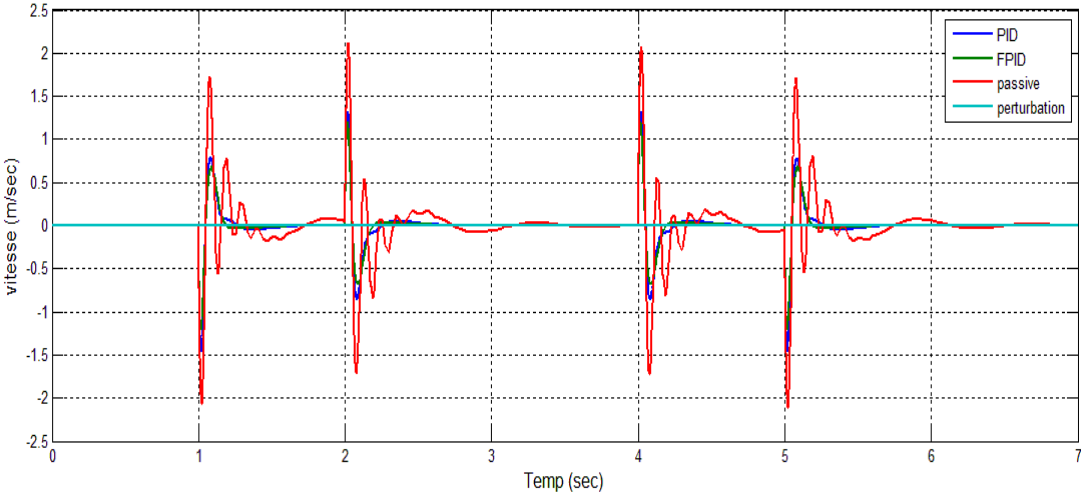


Figure III.8 : Vitesse relatif du système de suspension.

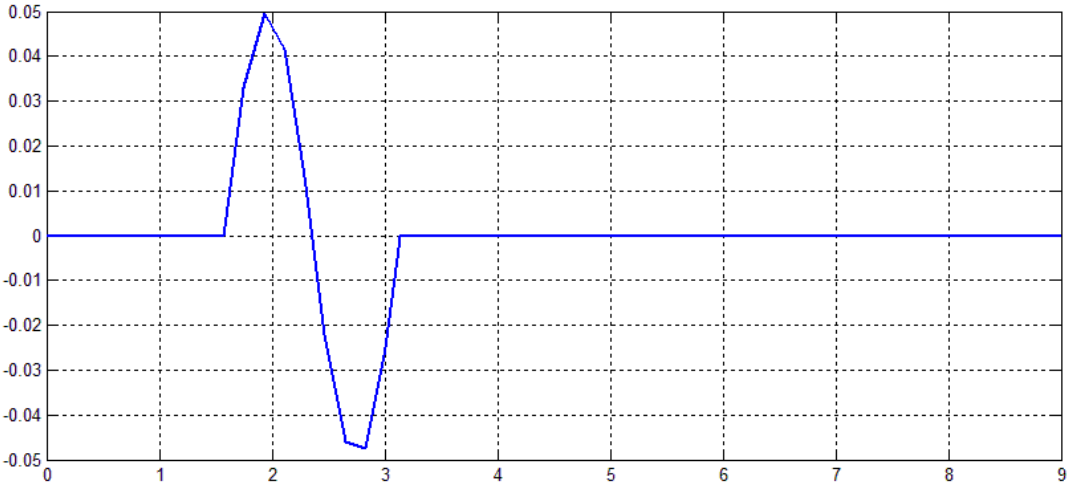


Figure III.9: Perturbation provenant de la route (irrégularités de la route)

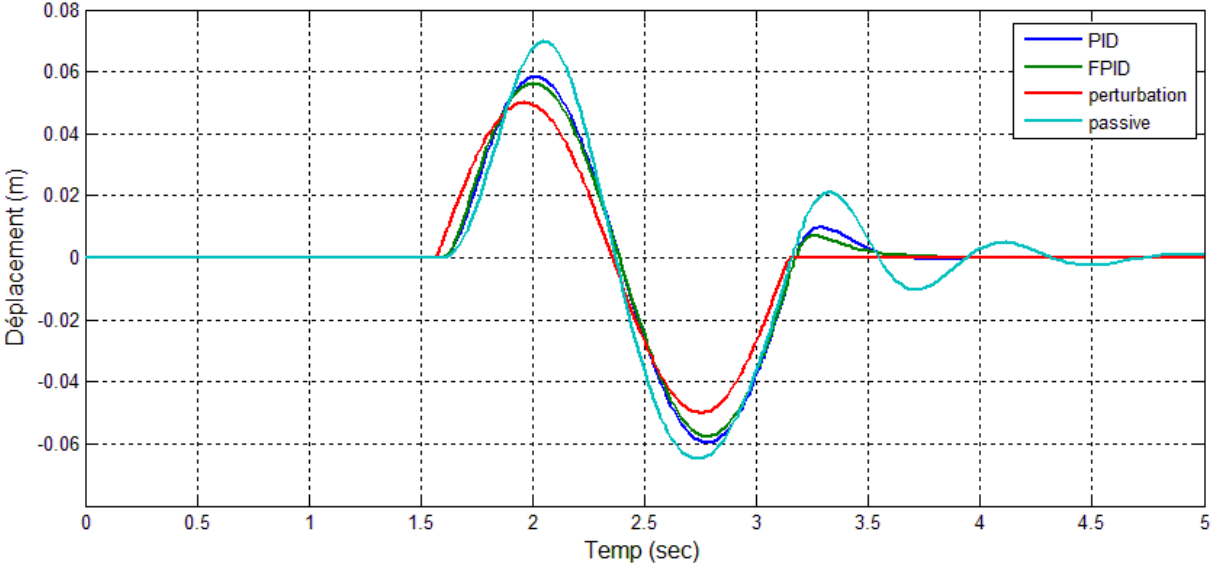


Figure III.10 : Déplacement vertical du châssis

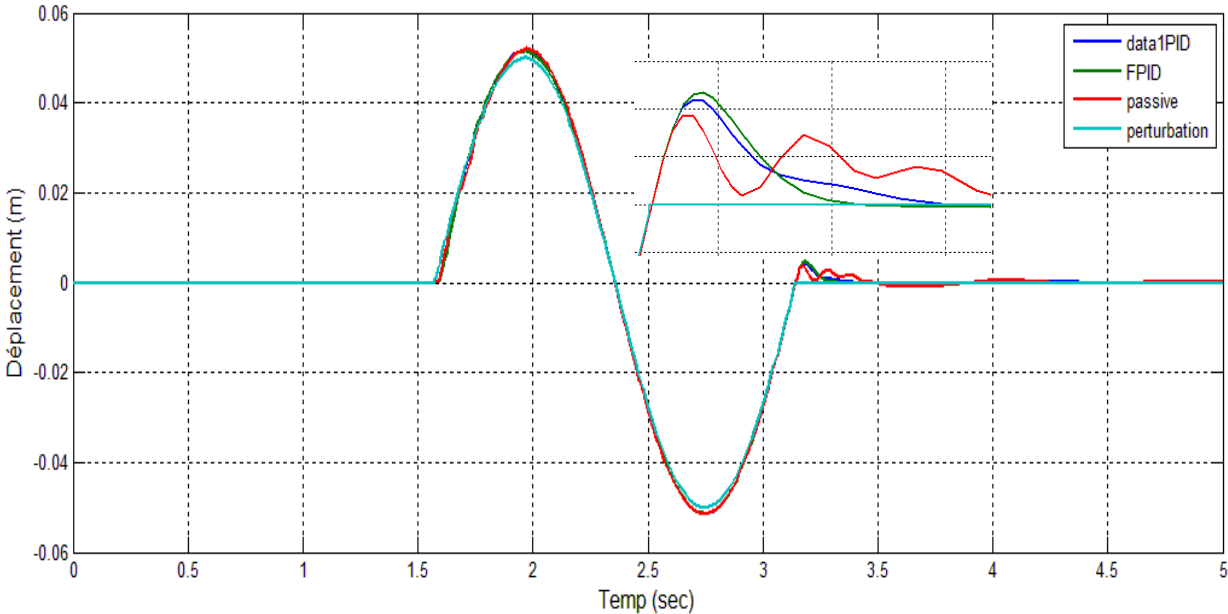


Figure III.11 : Déplacement relatif du système de suspension.

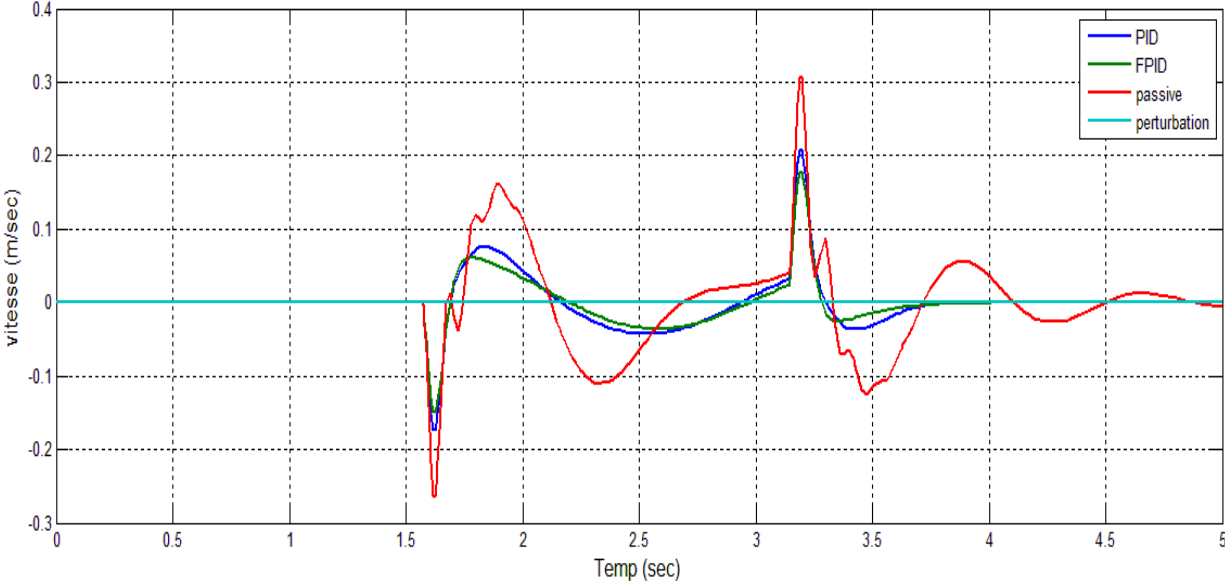


Figure III.12 : Vitesse relatif du système de suspension.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous appliquons la commande PID floue pour stabiliser le système de suspension active d'un véhicule automobile. Après la comparaison des résultats de simulation avec celles obtenus via la commande PID, nous remarquons que nos résultats de simulations sont très acceptables. Donc on peut dire que la stratégie de commande PID floue proposée pour contrôler la suspension active a réussi avec distinction.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les suspensions actives sont des systèmes dynamiques multivariables pour lesquels il n'est pas facile de dériver des modèles mathématiques. Par conséquent, les schémas de contrôle analytique basés sur des modèles aussi complexes ne fonctionnent généralement pas bien dans la pratique. D'un autre côté, on peut dire que les systèmes de contrôle intelligents tels que les contrôleurs à logique floue qui peuvent contrôler la partie non modélisée de la dynamique de la suspension sont simple à réaliser et peuvent donner un contrôle précis. Ce travail décrit un schéma de contrôle PID floue adaptative proposé pour la suspension du véhicule. En raison de sa capacité inhérente à représenter la dynamique, le contrôleur est facile à adapter aux tâches de contrôle et cette dernière supprime les vibrations du. Les résultats de simulation obtenus sont confirmé la faisabilité de la stratégie de contrôle PID flou proposé dans le système de suspension active.

Références bibliographiques

- [1] Sie, W.T, Lian, R.J., Lin, B.F.: Enhancing grey prediction fuzzy controller for active suspension systems. *Veh. Syst. Dyn.* 44(5), 407–430 (2006).
- [2] Ozgur Demir · Ilknur Keskin · Saban Cetin. Modeling and control of a nonlinear half-vehicle suspension system: a hybrid fuzzy logic approach. Received: 14 February 2011 / Accepted: 12 June 2011 / Published online: 14 July 2011.
- [3] Ouagueni, F. (2012). Stabilisation des systèmes non linéaire via des modèles flous incertains de type Takagi-Sugeno (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [4] Ouagueni, F. Talhi, A. (2013). Stabilisation des modèles flous incertains de Takagi-Sugeno via la commande multi-contrôleurs linéaires : approche LMI (International conference on systems and processing information, Guelma, Algérie).
- [5] M. Senthil kumar, S. Vijayarangan, “Analytical and experimental studies on active suspension system of light passenger vehicle to improve ride comfort” PSG College of Technology, Coimbatore 641 004, India, Proceedings of ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2007. Nr.3.
- [6] Modelling and Analysis of Quarter Car Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic. Bhanu Chander V, B.Tech Thesis, Mechanical Engineering Department, Sri Venkateshwara, Univeristy College of Engineering, Tirupati, AP, India
- [7] M. Senthil kumar, S. Vijayarangan, “Analytical and experimental studies on active suspension system of light passenger vehicle to improve ride comfort” PSG College of Technology, Coimbatore 641 004, India, Proceedings of ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2007. Nr.3.

-
- [8] Damien Sammier. Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicule. Automatique/ Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Français.
- [9] Design And Simulation Automobile Active Suspension Systeme Mohd Asqalani Bin Naharudin. Faculty Of Mechanical Engineering. Universiti Malaysia Pahang. November 2008.
- [10] Sami Rajala . H_{∞} CONTROL DESIGN OF AN ACTIVE VEHICLE SUSPENSION SYSTEM. Master of Science Thesis.
- [11] GILLESPIE, Thomas D.; (1992) Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale : Society of Automotive Engineers, Inc, 495p.
- [12] CHALASSANI, R.M.; (1986) Ride performance potential of active suspension system part I : Simplified analysis based on a quarter-car model. Symposium on simulation and control of ground vehicle and transportation systems: AMD-80(DSC2), pp. 187-204
- [13] DODDS C. J; ROBSON J. D. ; (1973) The description of road surface roughness. Journal of Sound and Vibration: Volume 31 (Numéro 2), pp. 175-183.
- [14] GORDON T.J. ; (1995) Non-Linear Optimal Control of a Semi-Active Vehicle Suspension. Chaos, Solitons, & Fractals: Volume 5 (Numéro 9), pp. 1603-1617.
- [15] BEN MRAD R. ; LEVITT J.A. ; FASSOIS S.D. ; (1994) Non-linear dynamic modeling of an automobile hydraulic active suspension system. Mechanical Systems and Signal Processing: Volume 8 (Numéro 5), pp. 485-517.
- [16] HANBA, Shigeru ; ISOBE, Osamu ; KAWABE, Taketoshi ; MIYASATO, Yoshihiko;WATANABE, Yoshito ; (1998) New semi-active suspension controller design using quasi linearization and frequency shaping. Control Engineering Practice 6, pp. 1183-1191.
- [17] GORDON T.J. ; (1995) Non-Linear Optimal Control of a Semi-Active Vehicle Suspension. Chaos, Solitons, & Fractals: Volume 5 (Numéro 9), pp. 1603-1617.
- [18] Hussein Sleiman. Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique. Pour l'automobile. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0020.

-
- [19] Hussein Sleiman. Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique. Pour l'automobile. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0020.
- [20] y.elbia, "commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation à flux orienté". mémoire de magister de l'université de batna, 2009.
- [21] http://www8.umoncton.ca/umcm.cormier_gabriel/Asservissements/GELE5313_Notes11.pdf.
- [22] magister.kermad_nedjwa. etude et implementation sur de microcontrolleur controleur flou.
- [23] <http://franck-dernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logique-oue/>
- [24] F. Chevré, F. Guel, 1998, "La logique floue", Collection technique Schneider, Cahier technique 28 pp.
- [25] <https://www.elprocus.com/the-working-of-a-pid-controller/>
- [26] Asservissement PID
- [27] Jean pierre Corriou, « commande des procédé », édition Lavoisier, Paris 1996.
- [28] G. Gasso, Octobre 2003, "Correction des systèmes linéaires continus asservis", INSA de Rouen.
- [29] Hindawi Publishing Corporation. Mathematical Problems in Engineering Volume 2014, Article ID 107184, 14 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/107184>.
- [30] Mamdani Fuzzy PID Controllers.
- [31] M. Santos, S. Domido**, J. M. de la Cruz .Dpto. de Informtica y Automhtica. Facultad de Fisicas. (UCM) .Dpto. de Informhtica y Automhtica. Facultad de Ciencias. (UNED) .Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADR1D (Spain).
- [32] H. Shayeghi, A. Younesi, Y. Hashemi, Optimal design of a robust discrete parallel FP + FI +FD controller for the automatic voltage regulator system. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 67,66–75 (2015).
- [33] Hossein Shayeghi and Abdollah Younesi. Fuzzy PID Control of Microgrids. Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_23.

-
- [34] X. Xiang, C. Yu, L. Lapierre, J. Zhang, Q. Zhang, Survey on fuzzy-logic-based guidance and control of marine surface vehicles and underwater vehicles. *Int. J. Fuzzy Syst.* **20**, 572–586(2018).
- [35] lu jianhong , chen laiuiu , zhao sujin & wu yiqian published online: 30 nov 2010.
- [36] Hu, B., Mann, G. K. I., Gosine, R. G., 1997. Theoretic and genetic designs of a three-rule fuzzy PI controller. *Proc. Sixth IEEE Int. Conf.. Fuzzy Syst.*,1489-1496.
- [37] Engin Yesil, Müjde Güzelkaya, Ibrahim Eksin. FUZZY PID CONTROLLERS: AN OVERVIEW. *Istanbul Technical University, Electrical and Electronics Faculty, Control Systems Division, 34390, Maslak, Istanbul, TURKEY.*
- [38] Arzen. K. E., Johansson, M., Babuska, R., 1999. *Fuzzy Algorithms for Control*, Verbruggen, H. B., Zimmermann, H.-J., Babuska, R. (editors), Kluwer Academic Publishers.
- [39] Wong C. C., Feng, S. M., 1994. A switching type of fuzzy controller. *Proceeding of the 3rd IEEE World Conference on Computational Intelligence*, 30-34.
- [40] M. chadli, a. rabhi, a. el hajjaji are with université de picardie jules verne (upjv), laboratoire modélisation, information et système (mis),
- [41] F.BEDAUCHE, A.HASSAM, A.GAMA, A.BELAID Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie.