

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



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Electrique

Laboratoire de Commande des Processus



Mémoire de Magister

Spécialité : Automatique

Option : Robotique et productique

Présenté par :

Nabila BOUBAYA

Ingénieur d'Etat en Automatique, de l'université de Sétif

Intitulé :

Commandes non Linéaires d'un Palier Magnétique Actif

Soutenu publiquement en 02/02/2010, devant le jury composé de :

L. NEZLI	MC à l'ENP	Président
M. TADJINE	Professeur à l'ENP	Rapporteur
F. BOUDJEMA	Professeur à l'ENP	Examinateur
N. BALI	MC à USTHB	Examinateur
A. TLEMÇANI	MC à l'université de MEDEA	Examinateur
M. S. BOUCHERIT	Professeur à l'ENP	Invité
B. ATOUI	Sonelgaz de M'sila	Invité

DEDICACE

- 🌸 *A ma très chère mère.*
- 🌸 *Aux mémoires de : mon très cher père et mon frère Abdel krim.*
- 🌸 *A mon époux Mourad*
- 🌸 *A mes sœurs et leurs maris.*
- 🌸 *A mes frères et leurs femmes.*
- 🌸 *A toute ma famille.*
- 🌸 *A ma belle famille MAAZOUZ à Bordj Bou Arreridj*
- 🌸 *A les fleurs de ma famille : djahida, salsabile, said, sérine, elhame nésrine, Abdel badia el tayeb.*

Je dédié ce modeste travail.

Nabila

REMERCIEMENTS

L'ensemble des travaux présentés dans cette mémoire a été effectué au Laboratoire de Commande de processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et profonde gratitude au M. Tadjine professeur à l'ENP qui m'a donné les bases de mon travail, l'a orienté et l'a suivi avec attention et patience.

Mes remerciements les plus chaleureux et plus sincères sont adressés à Monsieur M.S. Boucherit, professeur à l'ENP, pour ses précieux conseils, ses encouragements tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance est toute acquise à Monsieur S. Barkat Docteur à l'université de M'sila, qui m'aide beaucoup.

Je tiens également remercier Monsieur M.L.Nesli, MC à l'ENP pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur le F. Boudjema professeur à l'ENP, à N.Bali MC à UTHB et Monsieur A. Tlemçani MC à Université de Médéa, pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateurs de ce travail.

Je ne saurai oublier d'exprimer ma gratitude à mon grand frère et à mon mari pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Table des Matières

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Paliers magnétiques actifs (PMA)

I.1	Introduction.....	4
I.2	Historique.....	5
I.3	Différents types de palier.....	6
I.3.1	Palier lisse.....	6
I.3.2	Palier à roulement.....	7
I.3.3	Palier Magnétique Actif (PMA).....	7
I.3.4	Caractéristiques du PMA.....	8
I.4	Description de la partie commande des PMA.....	10
I.5	Paliers auxiliaires du PMA.....	11
I.6	Limite et champs d'application des PMA.....	12
I.7	Expression de la force électromagnétique.....	14
I.8	Différentes méthodes de commande des PMA.....	16
I.8.1	Commande par commutation.....	16
I.8.1	Commande par les courants de pré-magnétisation.....	16
I.9	Modélisation PMA à un degré de liberté (1-DDL).....	17
I.9.1	Modèle non linéaire.....	19
I.9.2	Modèle linéaire.....	19
I.10	Modélisation PMA à deux degrés de liberté (2-DDL).....	21
I.10.1	Modèle non linéaire.....	22
I.10.2	Modèle linéaire.....	22
I.11	Stabilité du PMA.....	23
I.12	Equilibrage des rotors déséquilibrés.....	24
I.13	Conclusion.....	25

Chapitre II

Commande par la logique floue

II.1	Introduction.....	26
II.2	Bref historique.....	26
II.3	Rappels des principes de la logique floue.....	27
	II.3.1 Ensembles flous.....	27
	II.3.2 Variables linguistiques.....	29
	II.3.3 Opérations sur les ensembles flous.....	29
	II.3.4 Fonction d'appartenance.....	31
II.4	Raisonnement flou.....	32
	II.4.1 Implication floue.....	32
	II.4.2 Modus ponens généralise.....	33
II.5	Réglage et commande par la logique floue.....	33
	II.5.1 Régulateur flou.....	34
	II.5.1.1 Base de règles.....	34
	II.5.1.2 Moteur d'inférence.....	35
	II.5.1.3 Interface de fuzzification.....	35
	II.5.1.4 Interface de défuzzification.....	37
II.6	Application de la logique floue au palier magnétique.....	39
	II.6.1 Synthèse du régulateur.....	39
	II.6.2 Régulateur flou de position.....	40
	II.6.2.1 Base de Règle.....	42
	II.6.2.2 Défuzzification.....	42
II.7	Conclusion.....	43

Chapitre III

Commande par mode de glissement

III.1	Introduction.....	44
III.2	Principe de fonctionnement.....	45
III.3	Synthèse de la commande par mode glissant.....	45
	III.3.1 Choix des surfaces de glissement.....	46

III.3.2	Condition d'existence et convergence d'une surface de glissement.....	47
III.3.3	Calcul de la commande.....	47
	<i>III.3.3.1 Définition des grandeurs de commande.....</i>	48
	<i>III.3.3.2 Expressions analytiques de la commande.....</i>	49
III.4	Le phénomène de réticence ou `chattering`.....	51
III.5	Différentes structures du contrôle par mode de glissement.....	53
	III.5.1 Structure par commutation au niveau de l'origine de commande.....	54
	III.5.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	54
	III.5.3 Structure de régulation avec ajout de la commande équivalente.....	55
III.6	Application de la commande par mode de glissement au PMA.....	56
	III.6.1 Le choix de la surface.....	56
	III.6.2 Condition de convergence.....	56
	III.6.3 Calcul de la commande.....	57
III.7	Conclusion.....	58

Chapitre IV

Analyse et comparaison des résultats de simulations

IV.1	Introduction.....	59
IV.2	Exemple de dimensionnement d'un PMA.....	59
	IV.2.1 Réponse du système en boucle ouverte.....	59
	IV.2.2 Stabilisation du PMA à l'aide d'un PID.....	60
IV.3	Application des commandes au PMA.....	61
IV.4	Influence de l'augmentation de la consigne.....	64
IV.5	Etude comparative.....	65
IV.6	Changement de point de fonctionnement	69
IV.7	Etude de la robustesse.....	70
IV.8	Précision et énergie.....	77
IV.9	Conclusion.....	79
	Conclusion générale.....	80
	Bibliographie.....	81

Introduction générale

Introduction Générale

Au cours des dernières années, le nombre de machines tournantes équipées de paliers magnétiques actifs n'a cessé de croître, grâce principalement aux nombreux avantages que présente cette technologie pour l'ensemble des turbomachines. Le palier magnétique actif est organe fixe supporte et guide l'arbre de transmission d'une machine tournante. Il se trouve sur les supports rigides des arbres en rotation, c'est la partie la plus concernée par les frottements. Jusqu'à une certaine époque, il n'y avait aucun type de palier qui supprimait totalement les frottements, jusqu'au moment de l'arrivée des paliers magnétiques, qui se caractérisent particulièrement par des frottements pratiquement nuls.

Une des propriétés inhérentes au palier magnétique est la nature de rotation sans contact et sans frottement. Cette nature lui confère plusieurs avantages par rapport aux paliers conventionnels. L'élimination du lubrifiant, diminution des vibrations, la rotation à des très grandes vitesses avec des accélérations importantes, une bonne endurance, une très grande longévité tous ça a fait de lui un équipement très important. Mais l'utilisation de ces paliers dans l'industrie n'a pas été très large, vu la complexité du contrôle de ce type de paliers. Ce n'est que récemment qu'on s'est penché à l'emploi des PMA dans l'industrie lourde, comme dans la conception des turbines à gaz et les réacteurs des avions.

Le palier magnétique actif est constitué essentiellement de deux paires d'électroaimants arrangés dans la partie fixe du palier [5], disposés à 90° l'une par rapport à l'autre. Dans la plus part du temps il est utilisé les matériaux ferromagnétiques, chaque paire d'électroaimants peut générer une force d'attraction, une dans le plan vertical et l'autre dans le plan horizontal. Les mouvements du rotor dans l'entrefer sont mesurés à l'aide des capteurs de position inductifs. Ces derniers envoient des signaux d'information sur le rotor et le correcteur en retour agit sur le courant de chaque électroaimant d'une manière à générer des forces nécessaires pour ramener le rotor à la position de consigne

Afin de pouvoir mettre en application les commandes pour asservir le PMA il va falloir déterminer la relation entre ces grandeurs d'entrée et ces grandeurs de sortie. L'ensemble de ces expressions constituent le modèle du système considéré et résultat de la modélisation le palier magnétique actif. Nous présenterons une modélisation du PMA à un degré de liberté pour mettre en évidence l'expression de la force générée par le champ magnétique des électroaimants. Nous verrons par la suite le modèle d'un PMA à deux degrés de liberté, une dans la direction verticale

et l'autre dans la direction horizontale. Le modèle est donné sous forme d'équation d'état et en fonction de transfert.

Les commandes des PMA sont classées en deux types. Il y a celles qui utilisent des courants de pré-magnétisation et celles qui n'utilisent pas de courants de pré-magnétisation (commande en commutation). Chaque commande présente des avantages et des inconvénients, la première à tendance à générer des pertes sous formes d'échauffement inutile du palier en régime établi. La deuxième est une commande en commutation ce qui provoque des discontinuités dans la commande et peut mener à des lois de commande rudes.

L'objectif principal de ce travail est de développer des commandes non linéaires du PMA. Dans ce but, le travail à effectuer comporte :

- Modélisation du PMA un degré de liberté ;
- Modélisation du PMA deux degrés de liberté;
- Etude des commandes non-linéaire et la synthèse des lois de commande ;
- Application de la commande PID et les commandes non -linéaire aux PMA ;
- Etude comparative entre les différentes commandes proposées.

Pour satisfaire les besoins de ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de quatre chapitres :

- ④ Le premier chapitre portera sur la description exhaustive des PMA, commençant par la partie mécanique magnétique et allant jusqu'à la méthode de mesure du déplacement du rotor dans le palier et l'électronique puissance de commande. Les principales caractéristiques du PMA sont énumérées ainsi que leurs principaux champs d'application. Nous avons consacré une partie pour la détermination des expressions reliant les entrées aux sorties afin de déterminer le modèle du PMA qui représente le comportement réel du système considéré. Plusieurs techniques de commande de PMA existent, que ce soit en type d'alimentation du PMA, suivant la nature de la commande, continue ou à commutation. Finalement on aboutira à un modèle non linéaire du PMA. La non linéarité est introduit par l'expression de la force générée par les électroaimants.

-
- ④ Dans le deuxième chapitre, nous commencerons par présenter la théorie des ensembles flous et de la logique floue ainsi qu'un ensemble de méthodologies concernant le contrôle flou (fuzzification, règles de contrôle flou, inférence, défuzzification) [1], [2] et nous terminerons par l'application de la commande par logique floue sur le palier magnétique actif.
 - ④ Dans le troisième chapitre, nous donnerons quelques notions fondamentales de la commande à structure variable et quelques concepts de base sur la théorie des modes glissants [3], [4]. Ensuite, nous appliquons la commande par mode de glissement sur le palier magnétique actif.
 - ④ Le dernier chapitre sera consacré à la mise en application des différentes techniques .Nous effectuerons plusieurs essais de simulation afin de comparer les techniques et voir l'apport de chacune et voir également l'influence des variations paramétriques du PMA sur ces techniques.

Le présent mémoire se termine par une conclusion qui résume tous les résultats obtenus dans cette étude.

Chapitre I

Paliers Magnétiques Actifs (PMA)

I.1. Introduction

Le palier magnétique actif PMA est un organe fixe, supporte et guide l'arbre de transmission d'une machine tournante. Le palier est un équipement mécanique lié intimement aux machines tournantes. Il se trouve sur les supports rigides des arbres en rotation, c'est la partie la plus concernée par les frottements. Jusqu'à une certaine époque, il n'y avait aucun type de palier qui supprimait totalement les frottements, jusqu'au moment de l'arrivée des paliers magnétiques, qui se caractérisent particulièrement par des frottements pratiquement nuls.

Dans ce chapitre nous présenterons brièvement l'historique des paliers et les différents paliers existant et nous insisterons beaucoup plus sur le palier magnétique actif (PMA) radial. Nous commencerons par la modélisation d'un PMA radial à un seul degré de liberté ce qui aide très bien à comprendre le comportement du palier magnétique actif, et en finir par la modélisation du PMA à deux degrés de liberté.

La modélisation du PMA repose principalement sur la connaissance des lois des circuits magnétiques. Ces lois vont servir pour déterminer la force générée par un électroaimant. Nous avons procédé par la modélisation d'un PMA à un degré de liberté afin de mieux comprendre le comportement du PMA puis nous développerons les équations du modèle du PMA à deux degrés de liberté. Nous donnerons le modèle non linéaire qui reflète beaucoup plus la réalité, en outre nous développerons le modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement donné [6].

Afin d'illustrer l'importance des PMA nous exposerons les avantages et les inconvénients du PMA. Aussi nous présenterons les limites d'utilisation des PMA ainsi que leurs différentes conceptions.

I.2. Historique

L'idée de suspension des rotors de machines tournantes, sans contact matériel et sans lubrification, en utilisant des forces magnétiques, n'est pas nouvelle.

Depuis longtemps, des paliers passifs ont été expérimentés en combinant des aimants permanents agissant en répulsion ou attraction pour réaliser de telles suspensions.

Cependant ; un théorème publié en 1842 par S.Eamshaw prouve qu'il est impossible de réaliser une suspension magnétique stable entièrement passive dans un champ statique.

L'université de Virginie, sous la direction du Dr.Beams, a réalisé à partir de 1950 des centrifugeuses à très grande vitesse de rotation (5×10^6 tr/min) pour de très petits rotors.

La suspension magnétique utilisée était à palier magnétique actif pour l'axe de rotation vertical et à palier radial passif.

En 1957, en France, l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (O.N.E.R.A) étudia et réalisa une suspension magnétique d'une maquette pour des essais en soufflerie, sans aucun contact. Ce fut la première suspension magnétique entièrement active connue.

La S.N.I.A.S (Société Nationale Industrielle Aérospatiale) a réalisé des volants d'inertie pour satellites à suspensions magnétiques hybrides : paliers radiaux passifs, palier axial actif.

Des travaux ont débuté vers 1969 au L.R.B.A. (Laboratoire de Recherche et de balistique Appliquée de l'Armée Française) par une étude comparative de suspensions passives et actives et leurs possibilités.

Les premières réalisations furent des volants à inertie dont un utilisant une suspension principalement passive pour le Centre National d'Etudes Spatiales (C.N.E.N) en France et un autre retenant des paliers magnétiques actifs pour la COMSAT (Communication Satellite Corporation) en 1972.

Dès cette période, les paliers magnétiques pouvaient prétendre trouver de nombreuses applications dans le domaine industriel. C'est ce qui a amené la S.E.P. (Société Européenne de Propulsion) à prendre la suite du L.R.B.A. et à poursuivre le développement des paliers magnétique actifs.

En 1976, la S.E.P. et S.K.F. – France ont fondé la S2M (Société de Mécanique Magnétique) pour permettre à la technologie du palier magnétique actif de passer à l'étape industrielle [12].

I.3. Différents types de palier

Actuellement il existe trois types de paliers que ce soit en paliers radiaux ou axiaux; qui sont les paliers lisses, les paliers à roulement et les paliers magnétiques. En réalité on trouve plusieurs façons de classer ces paliers. Ils peuvent être classés selon s'ils sont actifs ou passifs, avec ou sans lubrifiant, axial ou radial, dans tous ce qui suit on se penchera sur le palier radial.

I.3.1. Palier lisse

Les paliers lisses sont les paliers les plus simples de point de vue conception, mais leur principe de fonctionnement est relativement le plus complexe. Les paliers lisses sont constitués d'une ou de plusieurs parties. Les surfaces d'appui de l'arbre sont les coussinets, qui sont fait généralement en fonte douce ou en acier revêtu avec du laiton. La partie de l'arbre portée par le palier est le tourillon. La partie du palier qui porte l'arbre est le manchon. La surface de contact de l'arbre s'appelle la soie et celle du palier le régule.

Ce type de palier est le plus ancien des paliers. Néanmoins il est toujours utilisé, vu les avantages qu'il présente. Ce palier tolère un fonctionnement dans les conditions les plus contraignantes, que ce soit de point de vue charge importante, haute température ou vitesse élevée. Il possède une durée de vie importante, sur tout lorsque la machine fonctionne en régime de marche continue. Il est dans la plus part des machines formé de deux moitiés, ce qui rend son démontage très facile lors des inspections. Les jeux dans ces paliers sont de l'ordre de dixième de millimètre. On utilise un filme d'huile (d'eau ou de l'aire) comme lubrifiant et antifricition. Ce palier est très susceptible aux contaminations de l'huile par des particules solides, c'est pour ça qu'il est exigé d'installer des filtres de très faible porosité et on exige dans le cas des machines tournantes importantes un contrôle systématique de comptage de particules dans le lubrifiant avec un contrôle on line de la température métal des coussinets.

Ce palier est caractérisé par un frottement relativement important au démarrage, vu l'écrasement du filme d'huile à l'arrêt de la machine. Mais ce frottement diminue avec la vitesse de rotation de la machine. Pour les machines à grande charge les concepteurs prévoient des pompes de soulèvement du rotor afin qu'elles diminuent le frottement de démarrage, qui se retirent une fois la machine est en service. Dans des conditions normales de fonctionnement les intervalles de maintenance de ces paliers peuvent atteindre facilement des centaines de mille d'heures [7].

Ce palier est considéré généralement comme un palier passif. Néanmoins il y a certaines exceptions, où le palier lisse est actif, lorsque une de ces parties est modulé en déplacement

vertical moyennant un actionneur pneumatique, ou lorsque le débit de l'huile de graissage est modulé en pression dans les deux directions verticale et horizontale.

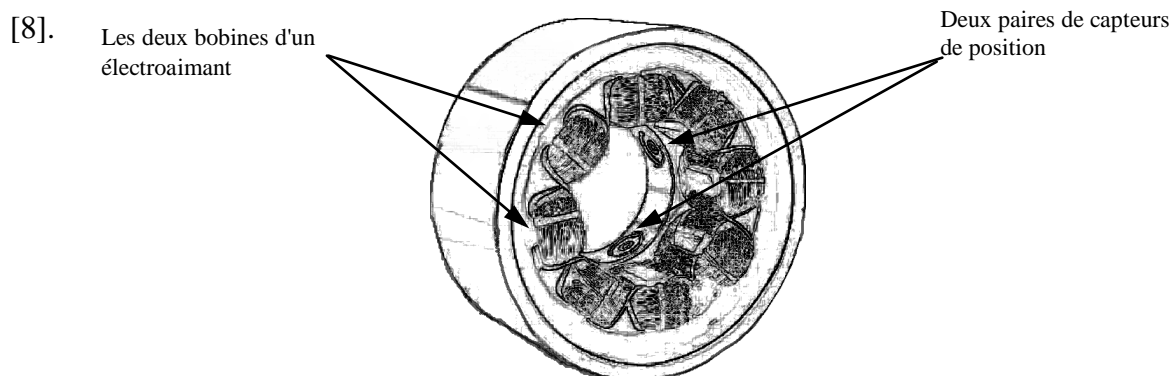
I.3.2. Palier à roulement

Le palier à roulement est couramment employé. Il substitue un mouvement de roulement au glissement. Il supporte des vitesses de rotation élevées mais ne peut pas être utilisé pour les charges importantes. Les paliers à roulement peuvent être à billes, à rouleaux ou à aiguilles. Dans un roulement à billes, les billes tournent librement entre un anneau interne solidement fixé à un arbre en rotation, et un anneau externe solidement fixé au palier. Les anneaux et les billes sont en alliage d'acier, avec une finition habituellement à très faible tolérance. Les billes sont maintenues par une monture qui leur assure un espacement régulier et qui les empêche de se frotter les unes contre les autres. La lubrification des roulements se fait avec de l'huile ou de la graisse.

Le roulement à rouleaux est semblable à un roulement à billes, mais des petits cylindres d'acier remplacent les billes. Le roulement à aiguilles est un roulement à rouleaux très longs et très fins. Un roulement à rouleaux comporte des rouleaux où la longueur est de l'ordre de deux fois la largeur, par contre les roulements à aiguilles, les aiguilles ont une longueur de l'ordre de dix fois la largeur. Les roulements à aiguilles sont particulièrement utiles dans les dispositifs où l'encombrement est limité.

I.3.3. Palier Magnétique Actif (PMA)

Le palier magnétique actif radial est constitué essentiellement de deux paires d'électroaimants arrangés dans la partie fixe du palier, disposés à 90° l'une par rapport à l'autre, comme il est représenté dans la figure ci-après Figure(I.1). Dans le cas des matériaux ferromagnétiques, chaque paire d'électroaimants peut générer une force d'attraction, une dans le plan vertical et l'autre dans le plan horizontal. Les mouvements du rotor dans l'entrefer sont mesurés à l'aide des capteurs de position inductifs. Ces derniers envoient des signaux d'information sur le rotor et le correcteur en retour agit sur le courant de chaque électroaimant d'une manière à générer des forces nécessaires pour ramener le rotor à la position de consigne



- 14 -

Figure I. 1: Palier magnétique actif.
(Modèle de SKF disponible de 0.06 à 40kN)

Une des propriétés inhérentes au palier magnétique est la nature de rotation sans contact et sans frottement. Cette nature lui confère plusieurs avantages par rapport aux paliers conventionnels. L'élimination du lubrifiant, diminution des vibrations, la rotation à des très grandes vitesses, une bonne endurance, tout ça a fait de lui un équipement très important. Mais l'utilisation de ces paliers dans l'industrie n'a pas été très large, vu la complexité du contrôle de ce type de paliers. Ce n'est que récemment qu'on s'est penché à l'emploi des PMA dans l'industrie lourde, comme dans la conception des turbines à gaz et les réacteurs des avions.

Dans le domaine de conception des machines ce n'est pas seulement le rendement qui compte mais il y a aussi la fiabilité qui est très importante. Ces deux paramètres sont le cheval de bataille de tous les concepteurs de machines. Si on sait que l'énergie dissipée dans les machines tournantes équipées de paliers ordinaires ne dépasse guère 1%, le recours au PMA n'est justifié que par le fait qu'ils ont de meilleures performances, notamment l'endurance, longévité et fiabilité de ces paliers. Dans l'industrie on entend toujours parler des équipements indisponibles à cause de l'usure des roulements. On imagine un petit peu le volume des coûts d'entretien de ces équipements surtout dans les usines qui possèdent des centaines voire même des milliers de ces équipements. Relativement, le PMA offre un coût de maintenance pratiquement nul [9].

I.3.3.1. Caractéristiques du PMA

Il existe deux types de PMA, il y a le PMA radial et le PMA axial. Le rôle du premier est de commander le déplacement du rotor dans la direction radiale, en revanche le deuxième, son rôle est de commander le déplacement axial du rotor. Le PMA est caractérisé par :

- ✓ **Entrefer**: c'est la distance entre le rotor et le stator, et il dépend du diamètre du rotor ou le palier. Généralement on prend un entrefer de 0.3 à 0.6mm pour les diamètres <100mm; et 0.6 à 1mm pour des diamètres >100mm.
- ✓ **Vitesse et l'accélération de rotation**: Dans les PMA radiaux la vitesse et l'accélération de rotation ne sont limitées que par la résistance de la surface feuilletée du rotor aux forces centrifuges. En utilisant des matériaux feuilletés standards on peut atteindre une vitesse superficielle de 200m/s, équivalent à 19000tr/mn pour un rotor de diamètre de 100mm. Dans le PMA axial la vitesse n'est limitée que par la résistance du disque du PMA aux efforts de poussées, avec du matériel standard on peut atteindre des vitesses superficielles de l'ordre de 350m/s.
- ✓ **Capacité en charge**: Cette caractéristique dépend principalement du diamètre du rotor, de la longueur axiale du stator du PMA et de la nature des matériaux ferromagnétiques utilisés. La charge unitaire max des PMA conçus avec des matériaux standard est 9daN/cm². Cette

charge unitaire est faible devant la charge unitaire des paliers conventionnels, mais la vitesse circonférentielle permise dans le PMA permet l'augmentation du diamètre du palier et du rotor sans l'augmentation de la longueur axiale, pour atteindre des surfaces circonférentielles qui permettent la même charge d'un palier conventionnel. En utilisant une solution très chère le cobalt-alloys comme matériau ferromagnétique qui possède une induction de saturation au-dessus de 2 Tesla, le PMA peut être conçu pour une induction de 1.9 Tesla pour atteindre une capacité de charge unitaire supérieure à 60N/cm² [10].

- ✓ **Energie consommée:** l'énergie consommée par le PMA est composée de l'énergie prise du rotor dépend du phénomène d'hystérésis et des courants Foucault, et de l'énergie consommée par l'électronique de puissance de la commande du PMA. Les pertes d'énergie dans les PMA sont moindres de 10 à 100 fois que les pertes dans les paliers conventionnels pour des machines d'un ordre comparable.
- ✓ **Conditions environnementales:** à ce jour les PMA ont fonctionnés dans des conditions très sévères, des températures qui va de 20K (-253°C) au +450°C voir même plus. Il y a des PMA conçus pour fonctionner dans le vide, l'air, eau de mer et hélium sans avoir besoin d'un système d'étanchéité.
- ✓ **Longévité:** la durée de vie du PMA est très élevée (40000 h entre deux pannes).

I.4. Description de la partie commande des PMA

Aux premiers temps, les armoires de commande des PMA étaient très gênantes de point de vue dimensions, mais actuellement avec le développement de la technologie de l'électronique de puissance les armoires ont diminués considérablement en encombrement et en puissance consommée tout en augmentant en fiabilité et en performances. Cette partie des PMA est très importante pour la stabilité et le bon fonctionnement du palier, et elle est responsable de la commande du PMA. La mesure de la position radiale du rotor dans le palier est donnée à l'aide de capteurs de position analogique, généralement on utilise deux paires de capteurs, une paire composée de deux capteurs inductifs diamétralement opposés pour la direction verticale et une paire pour la direction horizontale. Les deux paires sont montés en pont de Wheatstone et alimentés en courant alternatif de quelques dizaines de kilohertz comme il est représenté par la figure ci-dessous.

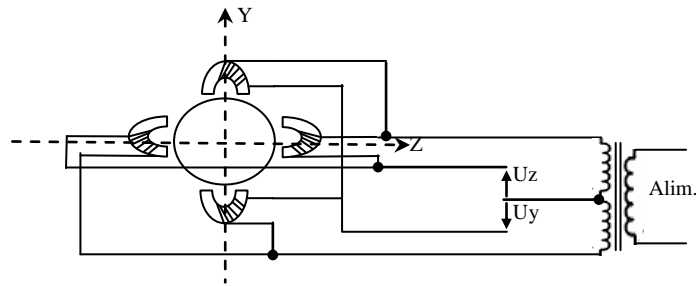


Figure I. 2 : Capteurs de position radiale

Les capteurs peuvent être fixés individuellement ou faire partie d'une couronne découpée de façon semblable à ceux des électroaimants du palier radial mais avec des dimensions plus faibles. Sur le rotor est fixée une couronne feuilletée en tôles magnétiques (généralement de 0.1mm), appelée couronne de référence.

On sait très bien que le système en boucle fermée est très sensible aux perturbations paramétriques sur le feedback donné par le capteur des grandeurs à réguler, cependant la fabrication de ces capteurs de position radiale nécessite un très grand soin en qualité de matériaux et en matière de procédure de fabrication. En ce qui concerne l'électronique de puissance on utilise des amplificateurs linéaires pour les paliers à faible puissance, mais pour les paliers à puissance plus au moins importante on doit passer aux amplificateurs à commutation qui ne consomment qu'environ le dixième de la puissance mise en jeu contrairement aux amplificateurs linéaires qui consomment environ la moitié de la puissance mise en jeu [12].

I.5. Paliers auxiliaires du PMA

La non utilisation de lubrifiant rend tout contact entre le rotor et le stator impardonnable et cause des dommages très importants. Ce cas peut avoir lieu si la commande est défaillante pour une raison ou une autre, ou lorsqu'il s'agit d'une perte de l'alimentation électrique du PMA, alors les concepteurs de machines tournantes lévitées par des PMA ont pensés à équiper la machine de paliers auxiliaires à roulement qui servent à l'atterrissage en douceur du rotor de la machine tournante. La figure ci-dessous illustre l'utilisation des paliers auxiliaires appelés aussi paliers d'atterrissage.

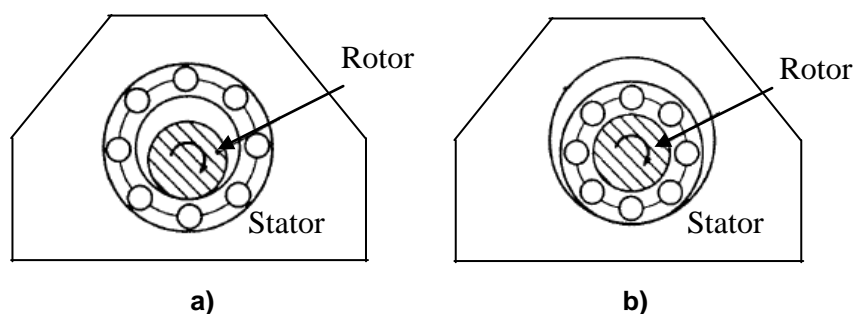


Figure I. 3: Paliers auxiliaires

La figure 1.3.a représente un palier auxiliaire fixe sur le stator. Un vide d'environ 50 à 60% de l'entrefer du PMA est laissé entre le rotor et le roulement du palier auxiliaire. Lorsque le rotor est en rotation autour d'un axe qui passe par le centre du PMA le roulement reste à l'arrêt, dans le cas où le rotor tombe sur le palier auxiliaire, le roulement se met à tourner éliminant ainsi des dégâts sur le rotor et le palier. La figure 1.3.b représente une autre façon de conception de palier auxiliaire qui a le même principe de fonctionnement sauf que cette fois ci le roulement est adhérente au rotor. Cette dernière se trouve limitée en vitesse de rotation vu que le roulement est en rotation avec le rotor et il ne supporte pas des vitesses tangentielles élevées [12].

I.6. Limite et champs d'application des PMA

Il y a trois décennies, le palier magnétique actif a été conçu pour surmonter les insuffisances des paliers conventionnels tels que les paliers lisses et les paliers à roulement. Principalement dans les laboratoires, ils ont prouvé leurs capacités et leurs aptitudes de fonctionner dans le vide sans avoir besoin de lubrification et sans contamination de l'environnement. Ils ont permis d'atteindre des vitesses de rotation très élevées et de donner aux systèmes à paliers magnétiques actifs des nouvelles dynamiques qui étaient inaccessibles auparavant.

Aujourd'hui, le palier magnétique actif a envahi le monde de l'industrie. Il est considéré comme un équipement de très grande valeur qui a pu être utilisé dans plusieurs applications. Maintenant il y a certaines questions qui viennent à l'esprit concernant leurs caractéristiques. Généralement on parle de la charge supportée par le PMA, sa dimension, sa précision, sa vitesse, les pertes, et notamment sa température de fonctionnement.

La charge supportée par le PMA dépend de certaines propriétés du palier. Notamment l'arrangement des électroaimants dans le PMA, la nature magnétique des matériaux utilisés dans la fabrication du palier et de la loi de commande utilisée dans le control du PMA. De plus, la

charge supportée par le PMA n'a pas un aspect statique seulement mais aussi un aspect dynamique qui compte beaucoup dans la détermination des dimensions du palier. Si les charges statiques sont faciles à déterminer ce n'est pas toujours le cas pour les charges dynamiques qui demandent une attention particulière pour pouvoir les déterminer. Actuellement il existe des PMA pour des charges de l'ordre de 50 tonnes utilisés dans des turboalternateurs hydrauliques.

La lévitation dans le PMA repose principalement sur le principe de la force magnétique générée dans un champ magnétique. Ce champ magnétique est généré par un courant qui traverse une bobine ou par un aimant permanent. Le matériau utilisé dans la fabrication du palier est généralement un ferromagnétique et peut être aussi un diamagnétique. Le matériau ferromagnétique exposé à un champ inducteur généré par un aimant ou un électroaimant, crée un champ magnétique orienté dans la même direction du champ inducteur ce qui provoque une force d'attraction entre le matériau et l'électroaimant. En revanche, le matériau diamagnétique crée un champ opposé au champ inducteur ce qui provoque des forces de propulsion [5].

La commande des PMA est classée en deux types. Il y a celle qui utilise des courants de pré-magnétisation et celle qui n'utilise pas de courants de pré-magnétisation (commande en commutation). Chaque commande présente des avantages et des inconvénients, la première a tendance à générer des pertes sous formes d'échauffement inutile du palier en régime établi. La deuxième est une commande en commutation ce qui provoque des discontinuités dans la commande et peut mener à des lois de commande rudes.

En ce qui concerne la température de fonctionnement elle est limitée principalement par la classe d'isolement du bobinage et par le type d'instrumentation utilisée pour la mesure du déplacement dans l'entrefer. Parce que c'est la partie du palier la plus sensible à la température. L'emploi des PMA dans les turbines à gaz et dans les avions nécessite un passage à une autre technologie d'isolation des bobines des électroaimants qui utilise une isolation faite avec un revêtement en céramique. Des PMA haute température sont en cours de développement, actuellement des prototypes ont atteint des températures de fonctionnement de l'ordre de 600°C. Les tests fonctionnels ont donné de bons résultats, mais des PMA haute température qui résistent à une exposition prolongée à des grandes températures nécessitent des recherches supplémentaires.

Les caractéristiques et avantages des paliers magnétiques actifs permettent leur utilisation aussi bien dans les petites machines que dans les très grandes [12].

- **Espace :** Les paliers magnétiques actifs sont utilisés pour la réalisation d'équipement de satellites tels que volants d'inertie et volant gyroscopiques.

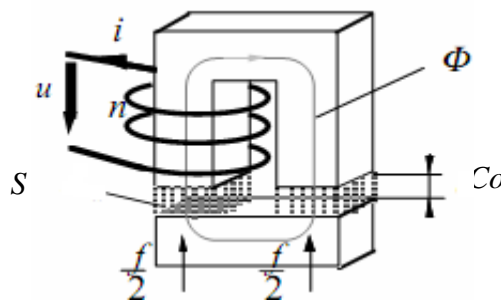
- **Laboratoire :** Une application et relative à des pompes à vide à hautes performances. Ces pompes permettent d'atteindre un vide de 10^{-14} bars.
- **Machines tournantes industrielle :** La gamme des machines auxquelles sont appliqués les paliers actifs est très large (compresseurs, ventilateurs, pompes, broyeurs, turbines,...etc.).
- **Machines spéciales :** des machines spéciales faisant appel à une très grande précision (par exemple le micromètre), utilisent la possibilité de détection et de correction qui est offerte par les paliers magnétiques actifs.

I.7. Expression de la force électromagnétique

Afin de pouvoir déterminer l'expression de la force électromagnétique appliquée par les PMA, on doit adopter certaines hypothèses simplificatrices et qui se rapprochent de la réalité des choses. La première des choses, on néglige les pertes de flux et on suppose que le flux est uniforme et la section du chemin emprunté par le flux est constante. Aussi on néglige les courants de Foucault induits dans le circuit magnétique [5].

$$\oint H \cdot ds = N \cdot i$$

$$B = \mu_o \mu_r \cdot H$$



On sait très bien **Figure I. 4: Représentation d'un circuit magnétique à partie mobile** lus

importante est bien la réluctance dans l'air. L'énergie la plus importante, dissipée dans le circuit magnétique est celle emmagasinée dans l'entrefer. L'énergie emmagasinée dans l'entrefer est donnée par l'expression suivante :

$$W_a = \frac{1}{2} B_a \cdot H_a \cdot V_a = B_a \cdot H_a \cdot s \cdot C_o \quad \text{(I-1)}$$

En appliquant le principe de la variation de l'énergie mécanique est égale à la somme des travaux externes du système on trouve:

$$dW_a = \frac{f}{2} \cdot dC_o + \frac{f}{2} \cdot dC_o \Rightarrow f = \frac{dW_a}{dC_o} = B_a \cdot H_a \cdot s$$

On applique le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot i, \text{ Soit } \frac{B}{\mu_o} \left(2C_o + \frac{l_s}{\mu_{rs}} + \frac{l_r}{\mu_{rr}} \right) = N \cdot i \text{ avec } l_s \text{ et } l_r \text{ (l'électro-aimant) et le rotor, et } \mu_s$$

et μ_r sont infinies. On a donc : $B = \frac{\mu_o \cdot N \cdot i}{2 \cdot C_o}$.

Alors :

$$f = \frac{B_a^2 \cdot s}{\mu_o} = \mu_o \cdot s \cdot \left(\frac{N \cdot i}{2C_o} \right)^2 = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i^2}{C_o^2} \right) \quad \text{(I-2)}$$

Réellement les forces générées par l'électroaimant ne sont pas parfaitement en parallèle avec l'axe de l'électroaimant. Elles constituent un angle α avec l'axe du repère comme il est représenté dans la figure ci-dessous. De ce fait on introduit un terme de correction qui est $\cos \alpha \approx 0.92$. L'angle α est très faible et dépend des grandeurs géométriques du système comme il est consigné dans la figure I.5 ci-dessous.

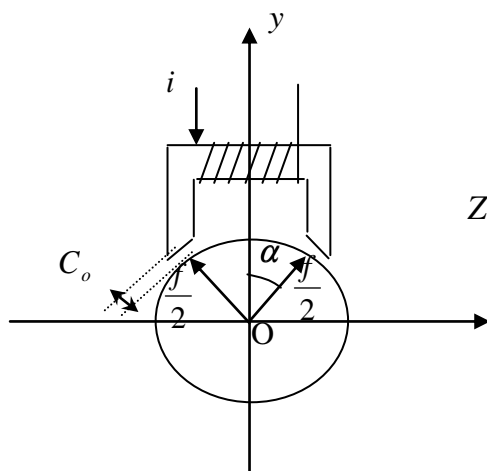


Figure I. 5: Force générée par le PMA

Alors la force est donnée dans un repère placé sur l'axe géométrique de la bille comme suit:

$$f = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y} \right)^2 \cdot \cos \alpha \quad \text{(I-3)}$$

- μ_o : est la perméabilité dans l'air.
- s : La surface de la section transitée par le flux.
- N : Nombre de spires d'une bobine.
- C_o : L'entrefer.
- i : Courant de commande.
- y : Déplacement vertical dans le repère OYZ

L'expression de la force montre bien qu'elle ne peut être que positive. En effet les matériaux ferromagnétiques exposés aux électroaimants ne donnent lieu qu'à des forces d'attraction. Nous devons utiliser deux électroaimants opposés l'un par rapport à l'autre afin de pouvoir contrôler ce système dans les deux directions. Cette conception permet d'imposer la dynamique du système dans le cas de la montée et de la descente de la bille [8].

En revanche l'utilisation d'un seul électroaimant dans le sens opposé de la gravité n'impose que la dynamique de la montée, la dynamique de la descente est fixe et imposée par la gravité, puisque la bille est abandonnée à elle même. Dans le cas où la gravité est nulle (cas de la commande de déplacement dans un plan horizontal) l'utilisation de deux électroaimants est indispensable.

I.8. Différentes méthodes de commande des PMA

Il existe plusieurs techniques de commande des PMA que ce soit en tension ou en courant. Elles peuvent être classées en deux types. Il y a celles qui utilisent la commutation entre les deux électroaimants diamétralement opposés et celles qui utilisent des courants de pré-magnétisation desdits électroaimants. Chaque technique possède des avantages et des inconvénients.

I.8.1. Commande par commutation

Dans cette commande on utilise la commutation franche entre les deux électroaimants qui donnent lieu à une force donnée par l'expression suivante:

$$f = \begin{cases} \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y} \right)^2 \cdot \cos \alpha ; & i \geq 0 \\ -\frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y} \right)^2 \cdot \cos \alpha ; & i < 0 \end{cases} \quad \text{(I-4)}$$

Dans la pratique, cette technique peut rencontrer des contraintes d'application, liés au fait de discontinuité de la force qui peut surgir au voisinage de $i = 0$ et aussi à la complexité de synthèse de la loi de commande. Mis à part ces difficultés cette méthode permet de diminuer l'énergie consommée par les PMA en régime établi et permet de diminuer l'échauffement inutile du PMA [13].

I.8.2. Commande par les courants de pré-magnétisation

En ce qui concerne la technique des courants de pré-magnétisation, la force est donnée par l'expression suivante:

$$F(y,i) = K \cdot \left[\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right] \quad \text{avec:} \quad K = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \cos \alpha \quad (\text{I-5})$$

I_o : Courant de pré-magnétisation.

Cette technique est moins complexe que la première. Elle permet d'avoir un modèle continu non linéaire. Néanmoins elle présente certains inconvénients, à titre indicatif, les courants de pré-magnétisation contribuent dans l'échauffement inutile du système et augmentent dans le temps l'énergie consommée par le PMA en régime établi. Lesdites courants sont des paramètres du modèle du système, ils doivent être générés par des sources de courant très stables, afin de ne pas avoir une variation paramétrique importante. Dans tous ce qui suit on utilisera cette technique pour déterminer les équations dynamiques des PMA.

I.9. Modélisation du PMA à un degré de liberté (1-DDL)

Dans cette modélisation, on adopte la technique de commande par les courants de pré-magnétisation évoquée dans (I.8.2). Afin de pouvoir écrire les équations dynamiques d'un système à un (1) degré de liberté, on prend l'exemple d'une bille suspendue entre deux électroaimants. Le système est représenté par la figure I.6:

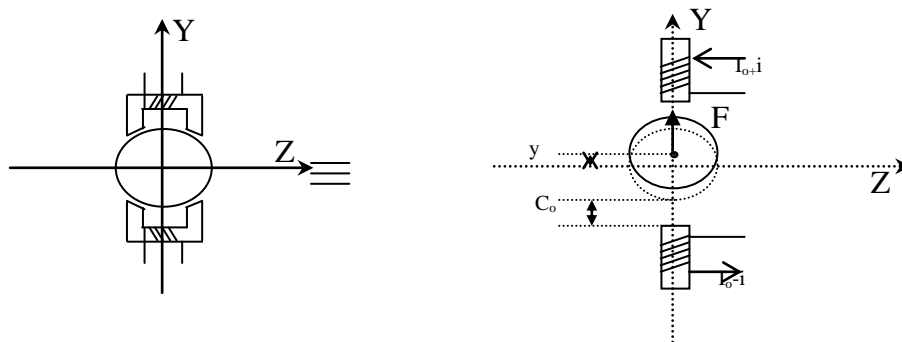


Figure I. 6: Représentation d'un PMA à 1 DL

Comme on la déjà présentée ci-dessus la force résultante appliquée par les deux électroaimants sur la bille est donnée par l'équation (I.5), pour α très petit on peut prendre $\cos \alpha \approx 1$, On aura l'expression suivante [8]:

$$F(y, i) = K \cdot \left[\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right] \quad \text{avec:} \quad K = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \quad \text{(I-6)}$$

I.9.1. Modèle non linéaire

On retrouve le modèle non linéaire du système en appliquant la loi fondamentale de la mécanique $\sum F = m \cdot \gamma$:

$$F - m \cdot G = m \cdot \ddot{y} \quad \text{(I-7)}$$

m : La masse de la bille.

G : La gravité.

\ddot{y} : L'accélération de la bille dans la direction verticale du repère OYZ.

En remplaçant la force F par son expression donnée par l'équation (I.6), on obtient le modèle suivant:

$$\frac{d}{dt} X = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} \quad \text{(I-8)}$$

Ce modèle reste valable lorsque la bille est posé sur un plan horizontal sans frottement il suffit d'éliminer la pesanteur en faisant $G = 0$.

Pour la caractéristique statique de la force en fonction du déplacement elle est de la forme présentée ci-dessous:

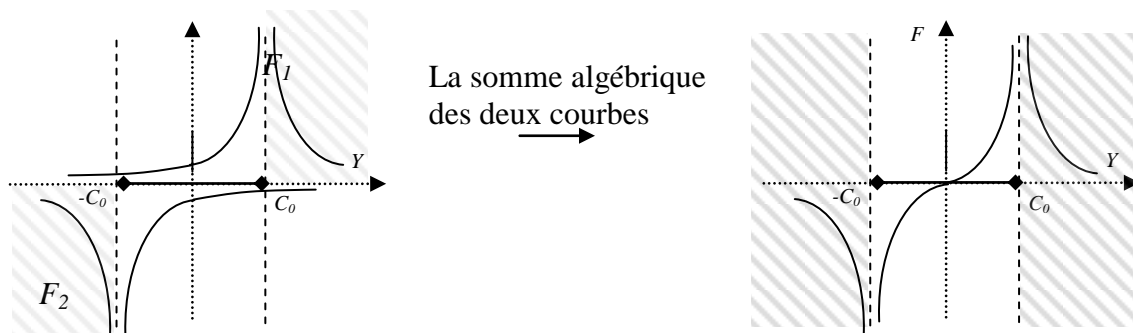


Figure I. 7: Caractéristique statique de la force en fonction de la position

Les forces F_1, F_2 correspondent respectivement à la force générée par l'électroaimant supérieur et l'électroaimant inférieur. La force F est la résultante des deux forces, c'est la partie qui fait introduire une non linéarité au système.

Le système est caractérisé par l'existence de deux points singuliers, où la force prend des valeurs très importantes. Ces deux points correspondent au cas où la bille est complètement collée à l'électroaimant; $y = C_o$ correspond au collage de la bille à l'électroaimant supérieur et $y = -C_o$ correspond au collage à celui de l'inférieur. Dans ces deux cas la force employée pour faire décoller la bille est très importante, alors il est judicieux d'éviter que la bille atteigne ces deux points singuliers moyennant les paliers auxiliaires on peut garantir que le rotor n'atteindra en aucun cas ces deux points singuliers. On admettra dans tous ce qui suit que la divergence du système est le fait d'atteindre ces deux extrémités [8].

I.9.2. Modèle linéaire

On voit très bien que les équations qui régissent le système sont réellement non linéaires. Pour retrouver les équations du modèle linéarisé du système on utilise le développement de Taylor de la force F au voisinage du point de fonctionnement (y_o, i_o) ce qui aboutit à:

$$F(y, i) = F(y_o, i_o) + \left[\frac{\partial F}{\partial y} \quad \frac{\partial F}{\partial i} \right]_{(y_o, i_o)} \bullet \begin{bmatrix} (y - y_o) \\ (i - i_o) \end{bmatrix} + O(y, i) \quad \text{(I-9)}$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{(y_o, i_o)} = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{(I_o + i_o)^2}{(C_o - y_o)^3} + \frac{(I_o - i_o)^2}{(C_o + y_o)^3} \right)$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{(y_o, i_o)} = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{(I_o + i_o)}{(C_o - y_o)^2} + \frac{(I_o - i_o)}{(C_o + y_o)^2} \right)$$

Pour des (y, i) très proches du point de fonctionnement (y_o, i_o) , on $O(y, i) \rightarrow 0$. Le terme peut être considéré comme une perturbation qui augmente en s'écartant du point de fonctionnement et qui devient insignifiant au voisinage du point de fonctionnement.

Dés lors l'équation dynamique s'écrit comme suit:

$$\ddot{y} = K_y \cdot y + K_i \cdot i - (K_y \cdot y_o + K_i \cdot i_o + G) \quad \text{(I-10)}$$

Avec:

$$K_y = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{(y_o, i_o)}$$

$$K_i = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(y_o, i_o)}$$

La gravité est considérée comme une grandeur de perturbation lorsque la bille est suspendue dans le plan vertical et elle peut être annulée par un choix judicieux du point de fonctionnement. Par exemple on peut choisir le point de fonctionnement de la manière suivante [8]:

$$y_o = 0$$

$$i_o = -\frac{m \cdot C_o^2 \cdot G}{4 \cdot K \cdot I_o} \quad \text{(I-11)}$$

Lorsque la bille est commandée dans le plan horizontal on a $G = 0$, on peut choisir le point de fonctionnement $(i_o, y_o) = (0,0)$, l'équation (I.10) donnée ci-dessus est simplifiée, et on obtient l'équation suivante:

$$\ddot{y} = K_y \cdot y + K_i \cdot i \quad \text{(I-12)}$$

Avec:

$$K_y = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2 \cdot I_o^2}{m \cdot C_o^3}$$

$$K_i = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2 \cdot I_o}{m \cdot C_o^2}$$

La fonction de transfert est donnée par la transformée de Laplace suivante:

$$Y(s) = \frac{K_i}{s^2 - K_y} \cdot I(s) \quad \text{(I-13)}$$

Où: $Y(s), I(s)$ sont respectivement les transformée de Laplace de $y(t)$ et de $i(t)$.

Le système peut être représenté dans l'espace d'état comme suit:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_y & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_i \end{bmatrix} \cdot i$$

$$y = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad \text{(I-14)}$$

On remarque très bien que ce modèle est valable pour les deux cas; lorsque le déplacement de la bille est dans le plan horizontal (sans frottement statique) ou vertical (sans frottement visqueux), il suffit de mettre la gravité $G = 0$ et on retrouve le même modèle mais avec K_x et K_y différents.

I.10. Modélisation PMA à deux degrés de liberté (2-DDL)

Le système à deux degrés de liberté est représenté par la figure I.8.b. C'est un système qui possède deux paires d'électroaimants, une paire dans la direction verticale identique à ce que nous avons présenté dans le cas d'un seul degré de liberté, et une autre paire dans la direction horizontale. Dans certains contextes on peut tolérer que l'action des deux paires d'électroaimants sont indépendantes et il n'y a pas de fortes interconnexions entre eux qui peuvent généralement être négligées.

Dans la pratique dans le cas de l'utilisation du palier magnétique pour supporter horizontalement un rotor, les deux paires ne sont pas disposées exactement d'une manière qu'une paire sera horizontale et l'autre sera verticale. Mais elles sont disposées de la manière illustrée par la figure I.8.a. Cette méthode de disposer les deux paires d'électroaimants permet de diviser la contrainte de gravité sur les deux paires et avoir une géométrie symétrique du palier [8].

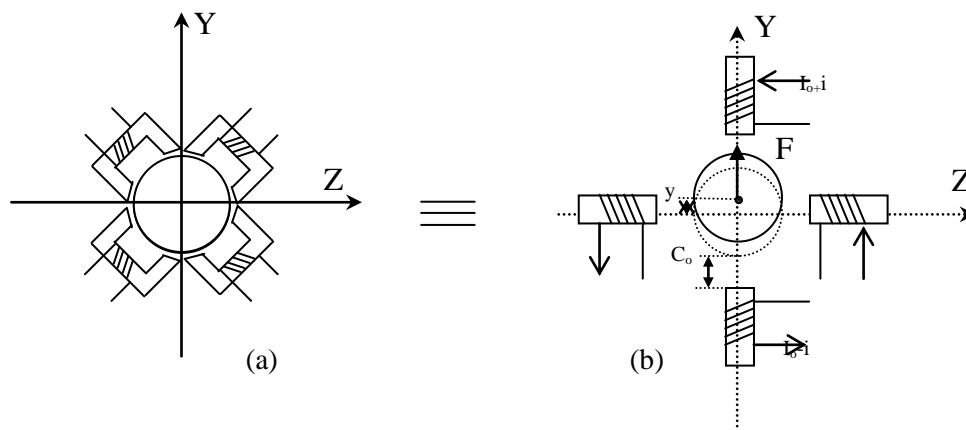


Figure I. 8: Représentation d'un PMA à 2 degrés de liberté

I.10.1. Modèle non linéaire

En agissant par analogie aux équations développées pour le cas de un degré de liberté, et partant de l'hypothèse que l'entrefer est très réduit nous trouvons les équations données ci-dessous représentées sous forme d'équation d'état:

$$\frac{d}{dt} X = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i_y)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i_y)^2}{(C_o + y)^2} \right) \\ \frac{dz}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i_z)^2}{(C_o - z)^2} - \frac{(I_o - i_z)^2}{(C_o + z)^2} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-15})$$

L'étude et l'asservissement du système à quatre degrés de liberté peut être résumée dans ce cas à l'étude l'asservissement du système à un degré de liberté, du moment où il est constitué de deux systèmes à un degré de liberté totalement indépendants et non interconnectés. La seule différence entre les deux directions est la présence de la gravité dans la direction verticale.

Cette possibilité est valable que dans certaines conditions, ce qui n'est pas toujours le cas spécialement pour les PMA à large entrefer, qui nécessite une attention particulière quant à la modélisation des interconnexions entre les deux directions, verticale et horizontale. On retrouve dans la littérature certains travaux de modélisation des paliers à large entrefer. Dans l'article [14] est développée une modélisation d'un PMA à deux degrés de liberté, en utilisant un modèle de force non linéaire couplé entre les deux axes pour un large entrefer, une stratégie de commutation est présentée dans le but d'assurer la force désirée pour l'asservissement du rotor.

I.10.2. Modèle linéaire

Avec un choix judicieux des points de fonctionnement qui élimine l'apparition de la pesanteur dans les équations et qui garde une symétrie dans les équations, le modèle linéaire du système est représenté dans l'espace d'état comme suit:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_z & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_{iy} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_{iz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i_z & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-16})$$

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

Il est donné aussi sous forme de fonction de transfert:

$$G_y(s) = \frac{K_{iy}}{s^2 - K_y} ; G_z(s) = \frac{K_{iz}}{s^2 - K_z} \quad (\text{I-17})$$

Ce système est un système diagonal, constitué de deux sous-systèmes totalement indépendants. Ce modèle est plus proche de la réalité d'autant l'entrefer est petit. En revanche, pour les PMA à entrefer large la modélisation fait entrer d'autres considérations qui font apparaître l'interconnexion entre l'axe vertical et horizontale [14].

I.11. Stabilité du PMA

En analysant les équations du modèle du PMA, que se soit à un ou deux degrés de liberté, on constate que le système possède un pôle réel situé dans la partie positive du plan d'Evans. Ce qui indique que le système en boucle ouverte est instable, d'où la nécessité d'une commande adéquate afin de le stabiliser et de lui conférer la dynamique voulue.

Beaucoup d'oeuvres ont exposé des méthodes de commande et de stabilisation du PMA. On cite l'exemple d'une commande à actions pures proportionnelle et intégrale et dérivé associée à un filtre (PID filtré) a été utilisé pour la commande d'un PMA [15], [16]. On trouve aussi dans la littérature des contributions de plusieurs techniques de commande que ce soit linéaire ou non linéaires [17], [18].

I.12. Equilibrage des rotors déséquilibrés

En mécanique de mouvement gyroscopique est très connu le problème de déséquilibre des rotors généralement sous forme de balourds. Ce phénomène est du essentiellement à plusieurs causes, à titre d'exemple il peut être causé par le fléchissement du rotor représenté par la figure I.9.

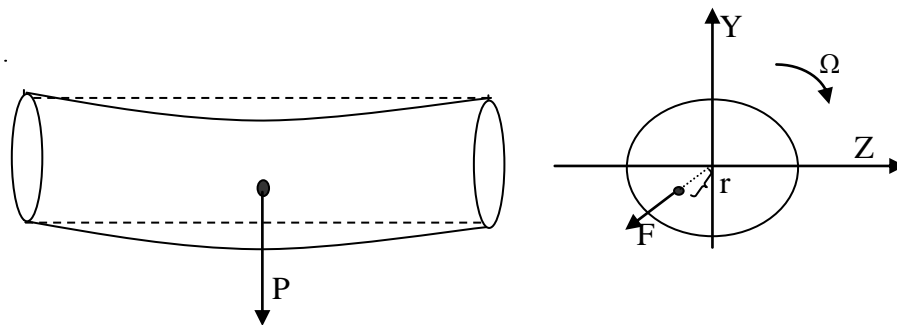


Figure I. 9: Représentation d'un rotor déséquilibré

Ce déséquilibre génère une force centrifuge vue par rapport aux axes vertical et horizontal comme une perturbation alternative donnée pour une vitesse de rotation constante par l'expression suivante :

$$F_y = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \varphi_y)$$

$$F_z = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \varphi_z) \quad \text{(I-18)}$$

Cette force est source des vibrations mécaniques qui peuvent causer une dégradation prématurée de la machine. Les interventions d'équilibrage conventionnel consistent à installer une masse de correction dans le sens opposé de la masse de déséquilibre pour annuler son effet et ramener le centre de gravité de l'ensemble au centre de l'axe de rotation qui se trouve habituellement au centre géométrique du rotor. En revanche l'équilibre actif consiste à ramener le centre de l'axe de rotation au centre de gravité du rotor déséquilibré ce qui annule la force centrifuge [19].

La différence entre la première solution d'équilibrage et la deuxième évoquées ci-dessus c'est que la première nécessite l'arrêt du rotor pour ajouter la masse de correction, En revanche la deuxième solution peut être faite lorsque rotor est en rotation moyennant des PMA, ce qui la rend actif. C'est un autre privilège qui s'ajoute aux propriétés des paliers magnétiques actifs.

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le palier magnétique actif comme une très bonne alternative pour surmonter les insuffisances des paliers conventionnels. Nous avons montré également que les PMA sont des paliers instables. Sans une commande de régulation le PMA ne peut pas fonctionner, alors un asservissement est indispensable pour le fonctionnement de ce palier. C'est un équipement très prometteur et offre beaucoup d'opportunités. C'est vrai qu'il nécessite une attention et un soin particulier dans sa conception, plus particulièrement dans sa commande mais nous pensons qu'il mérite toute cette peine.

La chose la plus importante dans l'utilisation des PMA c'est qu'ils offrent l'opportunité de faire un équilibrage actif du rotor afin de diminuer au minimum les vibrations mécaniques, causes des détériorations des équipements et de leur dégradation prématurée, si on sait que la longévité des équipements mécaniques est tributaire du niveau de ces vibrations. Actuellement avec les PMA ces niveaux de vibrations sont généralement divisés par un facteur de 10.

Chapitre II

Commande par la logique floue

II.1. Introduction

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels, mais plus généralement auprès de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par l'être humain. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles.

La commande floue produit un moyen efficace pour convertir la commande linguistique issue des connaissances d'un expert en un algorithme de commande automatique. Le régulateur flou est utilisé pour la commande des systèmes complexes ou mal définis et ceci sans avoir de données précises ou de modèles pour les représenter. En effet la commande floue est pratique dans le cas où le modèle mathématique du processus est à obtenir ou bien ne peut pas être obtenu sous forme d'équation préétablie. D'un autre côté, la commande floue est une technique à coût bas et facile à implémenter.

Le but de ce chapitre est de représenter un bref rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue, ainsi que son application pour le réglage de la position du palier magnétique actif.

II.2. Bref historique

Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications au réglage:

1965 : Le Professeur. L. A. Zadeh de l'Université de Berkeley (Californie) pose les bases théoriques de la logique floue.

1973 : L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.

1974 : Première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur. Suivie en 1980 par une application sur un four à ciment et en 1983 sur un épurateur d'eau.

1985 : Premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de commande [20].

II.3. Rappels des principes de la logique floue

Les systèmes réels sont généralement non linéaires. Leurs modèles sont exprimés sous forme d'un produit de fonctions non linéaire connues à l'aide de paramètres (constants et/ou lentement variables) inconnus. Malheureusement, il est souvent difficile, voire impossible de décrire tous les phénomènes mis en jeu dans un système à partir de fonctions non linéaires connues, notamment pour un système physique complexe. Une solution à ce problème peut être envisagée à partir d'une représentation de la dynamique du système non linéaire par un système flou ou les relations entre les entrées, les sorties et les états sont exprimées par des règles floues de type :

SI (condition) ALORS (action)

Les systèmes flous sont des systèmes à base de connaissances construits à partir des opérateurs de la logique floue. Cette logique est basée sur l'imitation des aspects approximatifs et qualitatifs du raisonnement humain. Cette théorie était mal perçue à l'époque du fait que le mode de penser était plus strict et technique. De plus, le terme choisi « flou » n'a pas contribué à rendre son acceptation facile.

La technique de commande floue est souvent présentée comme une technique robuste capable de compenser quasi naturellement les incertitudes et / ou le manque de connaissances précises quant au processus à commander. Dans la majorité des applications des régulateurs flous, ce dernier est construit à partir de connaissances linguistiques fournies par un expert.

II.3.1. Ensembles flous

La notion d'ensembles flous permet de traiter les situations intermédiaires. Les valeurs approximatives et les catégories aux limites mal définies, qui sont très souvent rencontrés dans le monde physiques c.à.d ne possèdent pas de critères d'appartenance bien définis.

Les ensembles flous sont une généralisation des ensembles nets, sont caractérisés par des fonctions d'appartenance [21].

- un ensemble net ou classique A de X est une collection d'éléments de l'univers de discours caractérisé par une fonction d'appartenance μ_A qui prend la valeur 0 pour les éléments de X n'appartenant pas à A et la valeur 1 pour ceux qui appartiennent à A (figure II.1.a).

$$\mu_A : X \longrightarrow \{1,0\} \quad (\text{II-1})$$

- un ensemble flou A est défini sur un univers de discours X, par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui prend ces valeurs dans l'intervalle [0,1] (figure II.1.b).

$$\mu_A(x) : X \longrightarrow [0,1] \quad (\text{II-2})$$

Cette fonction donne le degré d'appartenance de chaque élément $x \in X$ à A. En effet, un élément de l'univers de discours peut être entièrement ou partiellement membre de l'ensemble A. cet ensemble flou peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \} \quad (\text{II-3})$$

On adopte à cette notation d'autre représentation si X est discret ou continu [21] :

$$A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x \quad \text{SI X est discret} \quad (\text{II-4})$$

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad \text{SI X est continu} \quad (\text{II-5})$$

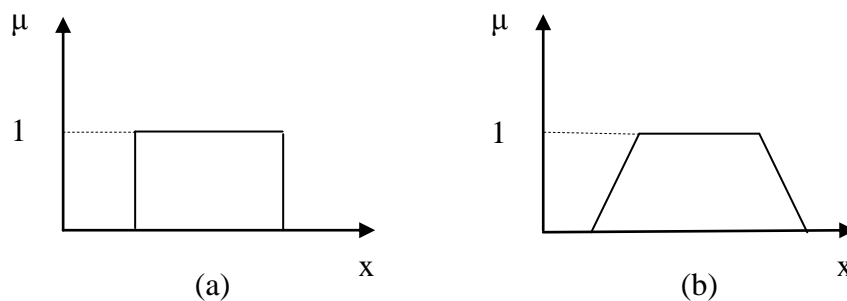


Figure II. 1: Fonction d'appartenance : (a) logique classique : (b) logique floue

II.3.2. Variables linguistiques

Les variables linguistiques sont des variables dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimés en langage naturel et non pas des nombres. Elles servent à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue [22].

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplet $\{x, T(x), X\}$ où x désigne le nom de la variable, X son univers de discours, et $T(x)$ son ensemble de valeurs linguistique. Par exemple, si l'erreur est considérée comme variable linguistique définie dans un domaine $X = [-0.2, 0.2]$, ses valeurs linguistiques peuvent être définies comme suit :

$T(\text{Erreur}) = \{\text{Négative grande (NG), Négative petite (NP), Environ zéro (ZE), positive petite (PP), positive grande (PG)}\}$

Ces valeurs linguistiques sont considérées comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées en figure (II.2).

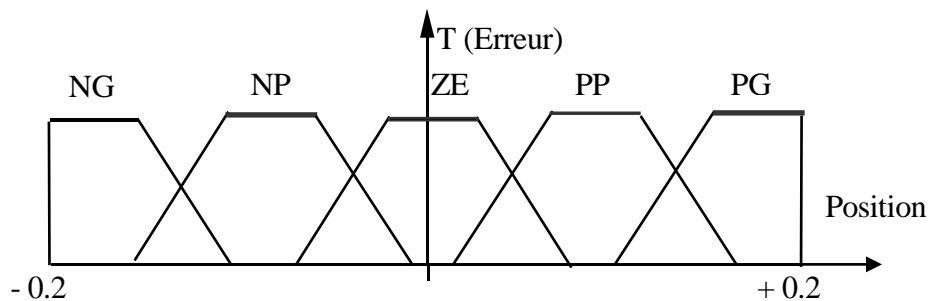


Figure II. 2: Fonctions d'appartenance de $T(\text{erreur}) = \{\text{NG, NP, ZE, PP, PG}\}$

II.3.3. Opérations sur les ensembles flous

La caractérisation des ensembles flous par les fonctions d'appartenance a permis une extension de certaines opérations définies sur les ensembles classique au cas flou.

Soient A et B deux ensembles flous définis dans l'univers de discours X ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance.

➤ Union floue (Disjonction) :

L'union de deux ensembles flous A et B de X est un ensemble flou $(A \cup B)$ de fonction d'appartenance

$$\forall x \in X: \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \oplus \mu_B(x) \quad (\text{II-6})$$

Le symbole « \oplus » représente la co-norme triangulaire. La co-norme triangulaire est le plus grand des degrés avec lesquels il appartient à A et à B, qui est la plus utilisé dans le domaine de la commande :

$$\mu_A(x) \oplus \mu_B(x) = \max (\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II-7})$$

➤ L'intersection floue (conjonction)

L'intersection de deux ensembles flous A et B de X est un ensemble flou ($A \cap B$) de fonction d'appartenance :

$$\forall x \in X: \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (\text{II-8})$$

Le symbole « * » représente la norme triangulaire. La norme triangulaire caractérise le plus petit des degrés avec lesquels il appartient à A et à B. Les normes les plus utilisés dans le domaine de la commande sont:

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \min (\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II-9})$$

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (\text{II-10})$$

➤ Produit cartésien :

Soient des ensembles flous A_1, A_2, \dots, A_n respectivement définis sur les univers de discours X_1, X_2, \dots, X_n , leur produit cartésien est un ensemble flou, désigné par $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$

Défini sur l'espace produit $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min (\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (\text{II-11})$$

➤ Relation floue :

Une relation floue représente le degré de présence ou d'absence d'association entre les éléments de deux ou de plusieurs ensembles flous [22].

Une relation floue d'ordre n est un ensemble flou dans l'espace $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, elle est caractérisée par la fonction d'appartenance $\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) \in [0, 1]$

Ou $x_1, x_2, \dots, x_n \in X_1, X_2, \dots, X_n$ respectivement la relation est définie par :

$$R_{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n} = \{ ((x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n)) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X_1, X_2, \dots, X_n \} \quad (\text{II-12})$$

➤ Composition des relations floues :

Soient R et S deux relations floues définies respectivement sur $X \times Y$ et $Y \times Z$. La composition de ces deux règles est une relation floue dénotée par $R \circ S$ sur $X \times Z$ de fonction d'appartenance définie par :

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \left\{ (x, z), \sup_{y \in Y} (\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)) \right\} \quad (\text{II-13})$$

II.3.4. Fonction d'appartenance

Pour le traitement numérique en logique floue, il est nécessaire d'associer pour chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance qui prend différentes formes suivantes (figure 2.3) [22] :

- fonction triangulaire : elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$:

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right] \quad (\text{II-14})$$

- fonction trapézoïde : elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$:

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad (\text{II-15})$$

- fonction gaussienne : elle est définie par deux paramètres $\{m, \sigma\}$

$$\mu(x) = \exp \left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (\text{II-16})$$

- fonction sigmoïdale : elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \quad (\text{II-17})$$

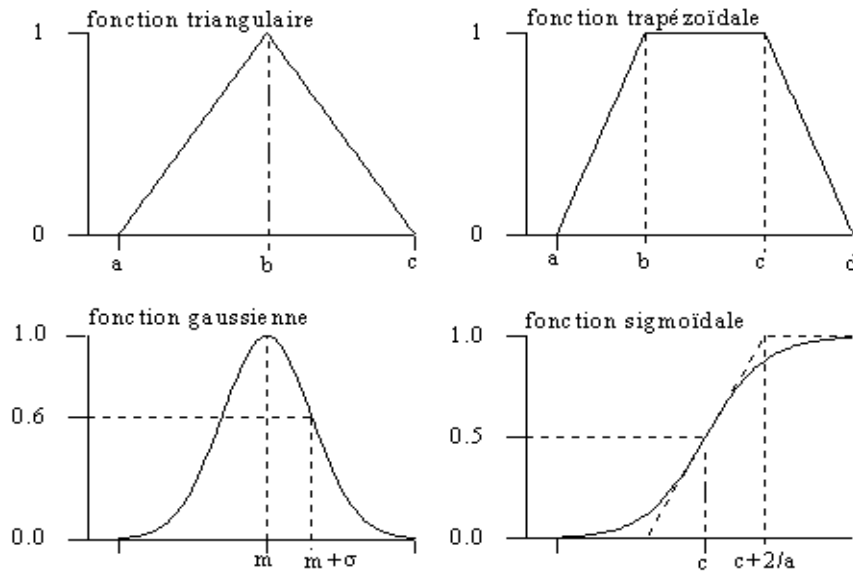


Figure II. 3: Forme des fonctions d'appartenance usuelles

II.4. Raisonnement flou

Le mode naturel est trop complexe. Ces mesures sont soumises à des imprécisions, vagues et éventuellement incertaines. Le raisonnement de ces connaissances en logique classique ne suffit pas, on fait appel à un raisonnement flou [1].

II.4.1. Implication floue

L'implication floue est un opérateur qui permet d'évaluer le degré de vérité d'une règle de la forme :

SI x est A ALORS y est B

A partir des valeurs de la prémisse d'une part, et de celle de la conclusion d'autre part. Ce degré de vérité est évalué à partir des degrés d'appartenance de x de A et y de B comme suit :

$$\mu_R(x,y)=\text{imp}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{(II-18)}$$

Les opérateurs les plus utilisés en commande floue sont les implications de Mamdani et de Larsen :

- implication de Mamdani : $\mu_R(x,y)=\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$ (II-19)

- implication de Larsen : $\mu_R(x,y)=\mu_A(x) \times \mu_B(y)$ (II-20)

II.4.2. Modus ponens généralisé

Il existe deux règles d'inférence importantes utilisées en logique floue : le modus ponens généralisé et le modus tollens généralisé qui sont une extension des règles d'inférence appliquées en logique classique : modus ponens et le modus tollens exprimés comme suit [1] :

	Modus ponens	Modus ponens généralisé
Fait :	x est A	x est A'
Règle :	SI x est A ALORS y est B	SI x est A ALORS y est B
Conclusion :	y est B	y est B'
	Modus tollens	Modus tollens généralisé
Fait :	y n'est pas B	y est B'
Règle :	SI x est A ALORS y est B	SI x est A ALORS y est B
Conclusion :	x n'est pas B	x est A'

A partir de la règle « SI A ALORS B » et du fait « A' », on déduit un nouveau fait « B' » qui est caractérisé par un ensemble flou dont la fonction d'appartenance est donnée par :

$$\mu_{B'}(y) = \sup(\mu_{A'}(x) * \mu_R(x,y)) \quad \text{(II-21)}$$

Les fonctions d'appartenance $\mu_{A'}(x)$ et $\mu_R(x, y)$ caractérisent respectivement le fait « A' » et la règle R_k [20], [21].

II.5. Réglage et commande par la logique floue

Le but de la commande floue est de traiter des problèmes de commande de processus. Elle se diffère cependant sur les points suivants [2] :

- La connaissance mathématique de la fonction du processus n'est pas nécessaire ;
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser) ;
- Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié « expert » ;

- Le régulateur par la logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage) mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

II.5.1. Régulateur flou

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la base de règle, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification comme il est montré par la figure (II.4):

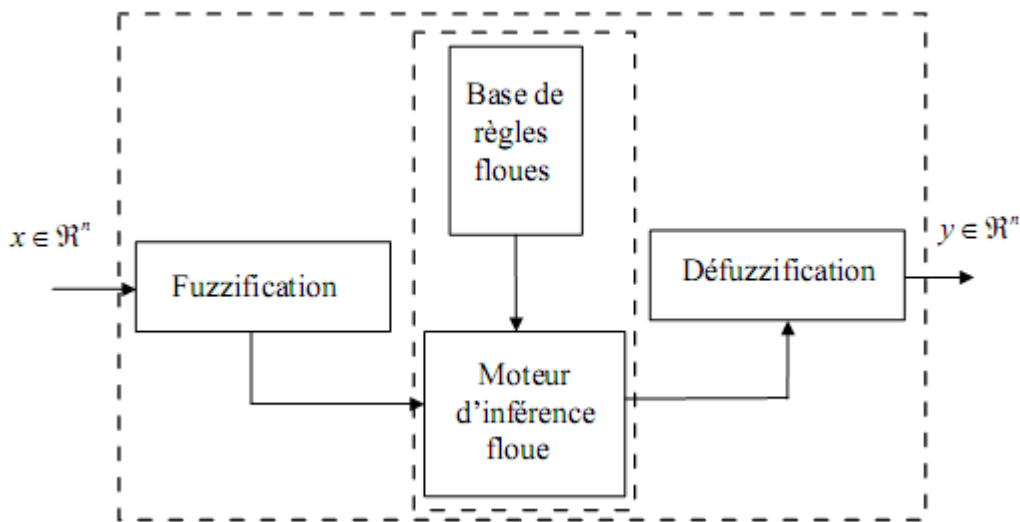


Figure II. 4 : Schéma synoptique d'un régulateur flou

II.5.1.1. Base de règles

La base de règles floues, ou base de connaissances, contient des règles floues décrivant le comportement du système, elle est le cœur du système entier dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de former le système final.

Ces règles peuvent être fournies par un expert ou peuvent être extraites de données numériques. Dans les deux cas, les règles prennent la forme « SI prémisse ALORS conclusion », à titre d'exemple [2] :

$$R_i^k : \text{SI } x_1 \text{ est } A_1^k \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ est } A_n^k \text{ ALORS } y \text{ est } B^k$$

Avec : $k=1,2,\dots, M$; A_i^k et B_k sont des ensembles flous dans $X_i \subset \mathfrak{R}$ et $y \subset \mathfrak{R}$ respectivement ; $x=[x_1, x_2, \dots, x_n] \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ et $y \in Y$.

x et y sont des variables linguistiques.

II.5.1.2. Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. En fait, le moteur d'inférence combine les règles floues, en utilisant le principe de la logique floue, pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivantes :

➤ Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani)

La méthode d'inférence max-min est réalisée, au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formulation du minimum.

La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie est réalisée par la formation du minimum. Enfin l'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

➤ Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)

La méthode d'inférence max-produit est réalisée, au niveau de la condition, l'opérateur « ET » par la formation du produit. La condition dans chaque règle, introduite par « ALORS » est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU », qui lie les différentes règles, est réalisé par la formation du maximum.

➤ Méthode de Sugeno

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [22], [23], [24].

II.5.1.3. Interface de fuzzification

Dans les problèmes de commande, les données observées sont habituellement physiques (réelles). Or le traitement de ces données est basé sur la théorie des ensembles flous; ceci nécessite donc une procédure de fuzzification.

L'opération de fuzzification représente le passage des grandeurs réelles (ou physiques) aux valeurs floues. Cette étape nécessite souvent une conversion analogique/digitale, ainsi que le traitement des grandeurs mesurées et leur transformation en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance [23].

A l'univers de discours d'une entrée X (ensemble des valeurs possibles de x), on associera N sous-ensembles flous notés E_i (valeurs linguistiques). Chacun de ceux-ci sera défini par sa fonction d'appartenance $\mu_{E_i}(x)$, $0 < \mu_{E_i}(x) < 1$.

Le rôle du bloc de fuzzification sera de déterminer pour un x_i donné (variable observée ou mesurée) les degrés d'appartenance de x_i à chacun des sous-ensembles flous E_i .

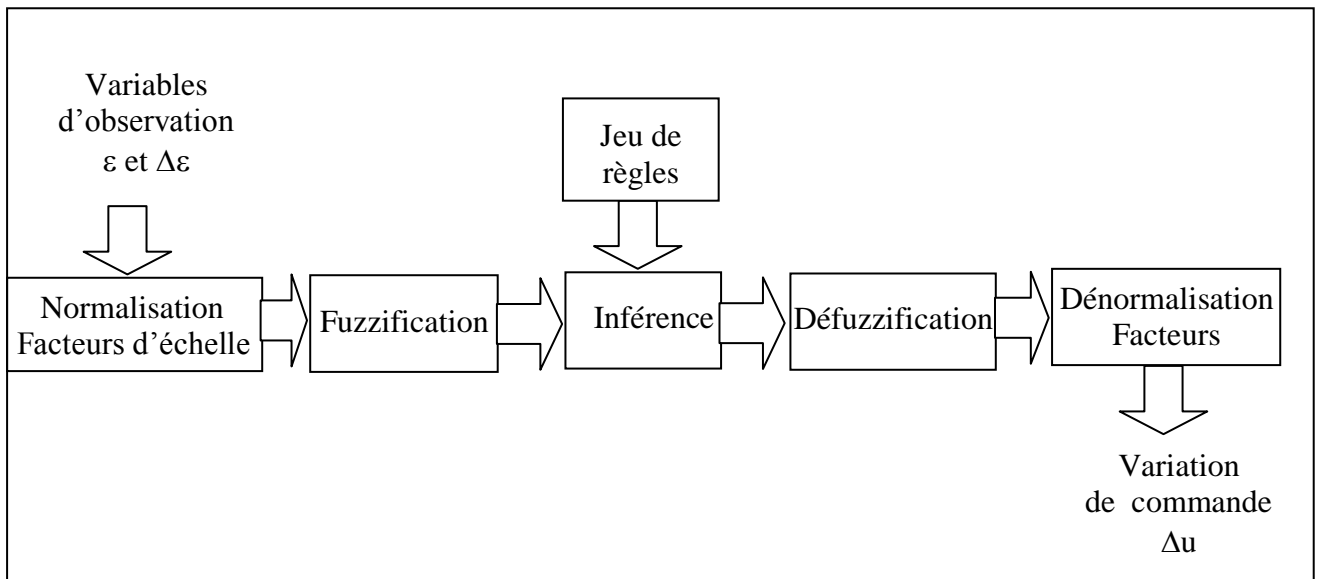


Figure II. 5: Configuration interne d'un contrôleur par logique floue

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée et de sortie. Dans le cas du réglage par logique floue, on utilise en général des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance.

Dans ce but, les grandeurs physiques (par exemple l'erreur et la dérivée de la grandeur à réguler) sont réduites à des grandeurs normalisées. On suppose que ces dernières varient normalement dans le domaine : $-1 \leq x \leq 1$.

Ceci pose le problème de choix des facteurs d'échelles. Les gains d'adaptation et de normalisation jouent alors un rôle extrêmement important car ce sont eux qui fixent les performances dynamiques de la commande.

En général, on introduit pour une variable x trois, cinq ou sept ensembles flous, représentés par des fonctions d'appartenance. Le nombre des ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désiré.

Une subdivision plus fine, c'est-à-dire plus de sept ensembles flous, n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système contrôlé par la logique floue. Par contre, un tel choix complique la formation des règles d'inférences et augmente le temps de traitement. Il existe deux types de fuzzificateur généralement utilisés à savoir : La fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton.

II.5.1.4. Interface de défuzzification

La sortie issue de l'inférence est une grandeur floue. Donc pour pouvoir définir la loi de commande, le régulateur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire pour l'état du processus [2].

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont :

- méthode du maximum ;
- méthode de la moyenne des maximas ;
- méthode du centre de gravité ;
- méthode des hauteurs pondérées.

➤ Méthode du maxima

Dans ce cas le défuzzificateur représente la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence. Cependant, cette méthode représente des inconvénients lorsqu'il y a plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

➤ Méthode de la moyenne des maximas

Le défuzzificateur examine l'ensemble flou qui détermine les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance est maximale, ensuite se fait le calcul de la moyenne des ces valeurs comme résultat de défuzzification.

➤ Méthode du centre de gravite

Le défuzzificateur détermine le centre de gravite \bar{y} et utilise cette valeur comme sortie du système flou. Ceci est donné par :

$$\bar{y} = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy} \quad (\text{II-22})$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface.

Il est à noter que cette méthode est généralement difficile à calculer. De ce fait, cette méthode est la plus coûteuse en termes de temps de calcul.

➤ Méthode des hauteurs pondérées

Le défuzzificateur d'abord évalue $\mu_B^k(y)$ en \bar{y}^k et calcul ensuite la sortie du système flou par :

$$y = \frac{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{y}^k) \bar{y}^k}{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{y}^k)} \quad (\text{II-23})$$

Où : \bar{y}^k dénote le centre de gravite de l'ensemble flou B^k

L'équation ci-dessus est facile à utiliser. Cependant, son inconvénient réside dans le fait qu'elle n'utilise pas la forme entière de la fonction d'appartenance.

Elle n'utilise que le centre \bar{y}^k du support de la fonction d'appartenance de la conclusion, et ceci sans tenir compte du fait que la fonction d'appartenance soit étroite ou large [25], [26].

II.6. Application de la logique floue au palier magnétique

En 1973, E.H. Mamdani est le premier qui a appliqué la technique de réglage par la logique floue utilisant le premier régulateur flou, celle-ci est construite d'un organe de décision utilisant des règles subjectives et imprécises données par des experts qui connaissent bien le système [22].

II.6.1. Synthèse du régulateur

La majorité des régulateurs utilisent le schéma simple proposé par Mamdani pour les systèmes SISO mono-entrée/ mono-sortie. Ce schéma est représenté par la figure (II.6) suivante :

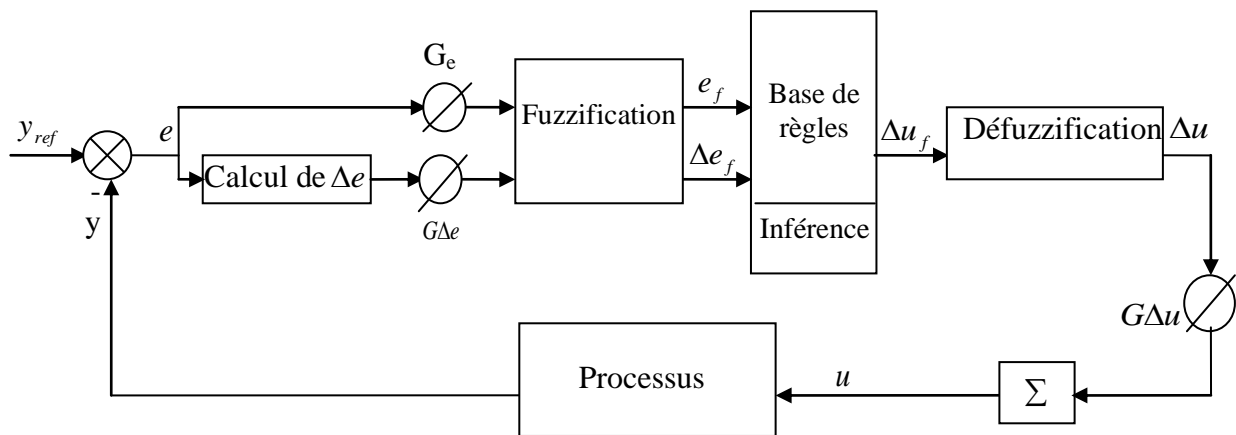


Figure II. 6 : Schéma bloc de régulation par la logique floue

D'après ce schéma le régulateur est composé :

- d'un bloc de fuzzification utilisé pour convertir l'erreur et sa variation en valeur floues ;
- des règles du régulateur flou ;
- d'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande floue en valeur numérique ;
- d'un bloc intégrateur.

Les méthodes choisies pour le succès des algorithmes flous permettent de formuler un ensemble de décisions en termes linguistiques, utilisant les ensembles flous pour décrire l'amplitude de l'erreur, de sa variation et de la commande appropriée. En combinant ces règles, on peut dresser des tables de décisions permettant de donner les valeurs de la sortie du régulateur correspondant aux situations d'intérêt.

Les facteurs d'échelle doivent être choisis sur la base de l'étude du système de sorte que, lors de petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour l'erreur et sa variation ne soit pas dépassé.

Les avantages du système flou de Mamdani peuvent être résumés par les points suivants:

- 1- La simplicité dans la représentation des règles floues : Dans ce type de système les conséquences aussi bien que les prémisses des règles flous prennent la forme d'ensembles flous, ce qui les rend facile à interpréter.
- 2- La flexibilité dans l'implémentation : Ceci est du à la liberté dans le choix des formes d'implication floues, du fuzzificateur et du défuzzificateur.

Le principal inconvénient de ce type de système est le nombre élevé de règles floues surtout lorsque le système est non linéaire et complexe [27], [28].

II.6.2 Régulateur flou de position

- **1 ère étape : Choix des entrées et sorties**

Dans le cas de la régulation de position, on a besoin habituellement de l'erreur ($e=y_{ref}-Co$) et de la dérivée d'erreur (de) :

$$\begin{aligned}e(k) &= y_{ref}(k) - Co(k) \\ de(k) &= e(k) - e(k-1)\end{aligned}\tag{II-24}$$

La sortie du régulateur de position est la valeur du courant.

Le régulateur possède des fonctions d'appartenance identiques, la différence réside dans les gains de normalisation (facteurs d'échelle).

- **2 ème étape : Définition des fonctions d'appartenance**

Le régulateur flou utilisé est de type Mamdani dont les entrées sont : l'erreur de position et sa variation et la sortie c'est le courant. Pour le choix de la forme des fonctions d'appartenance, nous avons opté pour la forme triangulaire et trapézoïdale, comme la montre la figure (II.7) :

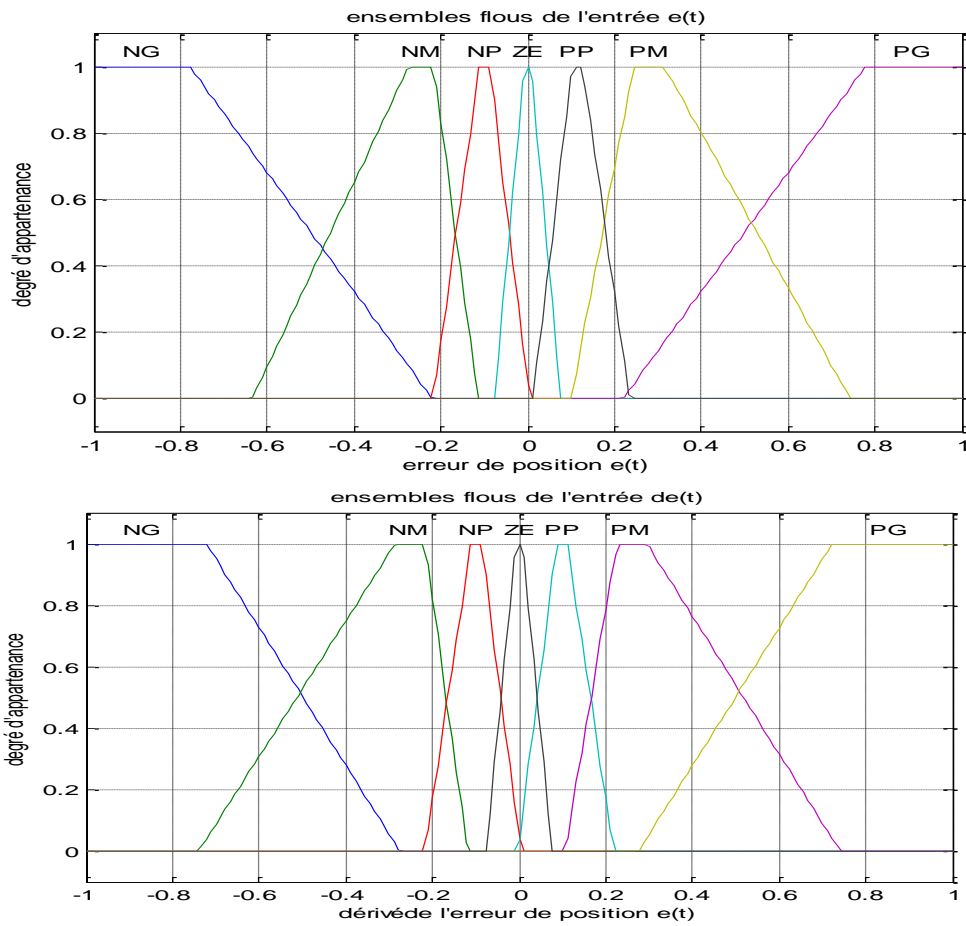


Figure. II.7 : Fuzzification des entrées e et de

La fonction d'appartenance de sortie est de la même forme que les fonctions d'appartenance des entrées comme indiquer la figure II.8 :

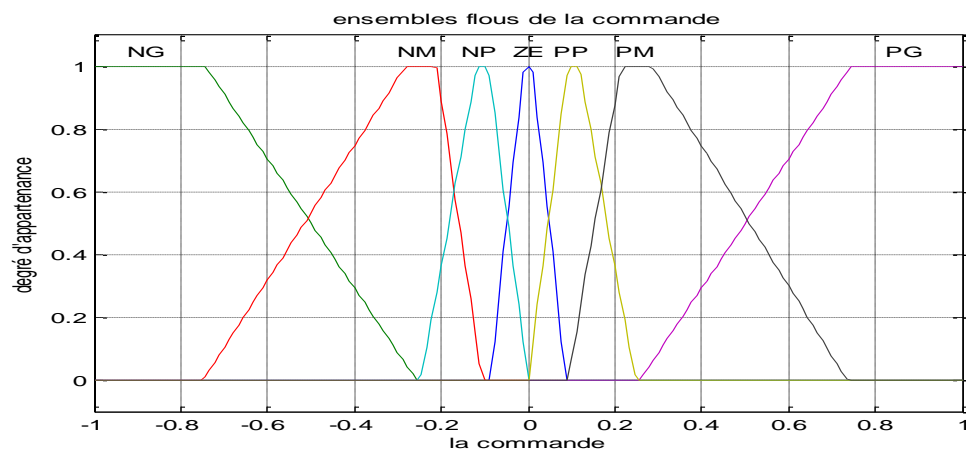


Figure II.8 : Fonctions d'appartenance de la commande

II.6.2.1 Base de Règle

Pour le régulateur de position la table des règles floues qui a servi au mécanisme d'inférence est donnée par le tableau II.1 [29], [30]:

		Dérivé de l'erreur						
Erreur		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
	NG	NG	NG	NG	NG	ZE	ZE	ZE
	NM	NG	NG	NM	NM	ZE	ZE	ZE
	NP	NG	NG	NP	NP	PP	PP	PM
	ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	NP	PP	PP	PG	PG
	PM	ZE	ZE	ZE	PM	PM	PG	PG
	PG	ZE	ZE	ZE	PG	PG	PG	PG

Tableau II.1 : Table des règles de décision pour le contrôleur de position.

Les ensembles flous sont notés comme suit:

- NG : Négatif grand
- NM : Négatif moyen
- NP : Négatif petit
- ZE : Environ zéro
- PP : Positif petit
- PM : Positif moyen
- PG : Positif grand

Pour le choix de la méthode d'inférence, nous avons opté pour la méthode Som-Prod, du fait qu'elle est facile à implémenter et donne de bons résultats [31].

II.6.2.2 Défuzzification

La sortie du mécanisme d'inférence est une variable cde floue. L'approximation floue de fonction doit convertir ses variables floues internes en grandeurs réelles de sorte que le système puisse utiliser ces variables [32].

En cette étape, une valeur réelle de la variable de sortie i est obtenue en employant la méthode du centre de gravité.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les principes de base des ensembles flous qui sont une généralisation du concept d'ensembles classiques. Contrairement à la fonction caractéristique d'un ensemble net qui prend la valeur 0 ou 1, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou prend ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$.

A partir des ensembles flous, nous pouvons construire des systèmes flous. D'un point de vue logique, un système flou est une machine de prise de décision composée de quatre parties essentielles : la fuzzification, la base de règles, le moteur d'inférence et la défuzzification. L'architecture d'un système flou est déterminé par meilleure compréhension des ensembles flous et des opérateurs flous. Nous avons constaté qu'il n'existe pas un seul type de système flou, mais il y en a plusieurs. Un utilisateur des systèmes flous doit décider sur la méthode de défuzzification, le type des fonctions d'appartenance, le type des règles floues et la stratégie de défuzzification. En particulier, nous avons appliqué le régulateur de Mamdani au palier magnétique actif.

Chapitre III

Commande par mode de glissement

III.1. Introduction

De nombreux systèmes réels présentent en plus des perturbations extérieures, des non linéarités et des erreurs paramétriques. Le recours à des algorithmes de commande robuste est donc souhaitable aussi bien en stabilisation qu'en poursuite de trajectoire.

La commande à structure variable (CSV) qui, par sa nature, est une commande non linéaire, possède cette robustesse. Elle est basée sur la commutation de fonctions de variable d'état, utilisées pour créer une variété ou hyper surface de glissement, dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface [33]. Quand l'état est maintenu sur cette hyper surface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées.

La commande à structure variable par régime glissant apparue depuis le début des années 60, grâce aux résultats théoriques du mathématicien (Utkin...) et elle a été étudiée et développée exclusivement en union soviétique dans les années soixante [34]. Par la suite, de nombreuses recherches ont été menées partout ailleurs ; soit pour compléter l'étude théorique, soit pour l'appliquer aux systèmes physiques.

La mise en œuvre de l'avantage qu'apporte cette commande par sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations, moyennant un choix approprié de la surface de commutation.

Dans la pratique, l'utilisation de cette technique de commande a été longtemps limitée par les oscillations liées aux commutations de la commande et qui peuvent se manifester sur les grandeurs asservis. Depuis, de nombreuses solutions ont été proposées permettant de réduire ces oscillations (augmentation de la fréquence de commutation) une commande continue dans une bande autour de la variété de glissement ou décomposition de la commande en une composante continue de basse fréquence et une commande discontinue de haut fréquence ou la méthode de la couche limite (en anglais boundary layer) sur lequel est basé notre travail ou la composante discontinue de la commande est remplacée au voisinage de l'hyper-surface de glissement par une fonction continue [35].

Dans ce chapitre nous allons donner quelques notions fondamentales de la commande à structure variable, et quelques concepts de base de la théorie des modes glissants. En fin on termine par une application sur le palier magnétique actif.

III.2. Principe de fonctionnement

L'idée de base de la commande par régime glissant est premièrement d'attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région. En résumé, une commande par régime glissant est divisée en trois parties [35] :

- Détermination d'une région d'espace d'état telle qu'une fois que le système se trouve dans cette région, il ait le comportement désiré ;
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence ;
- Définition d'une loi de commande qui conduise le système jusqu'à cette région d'espace d'état.

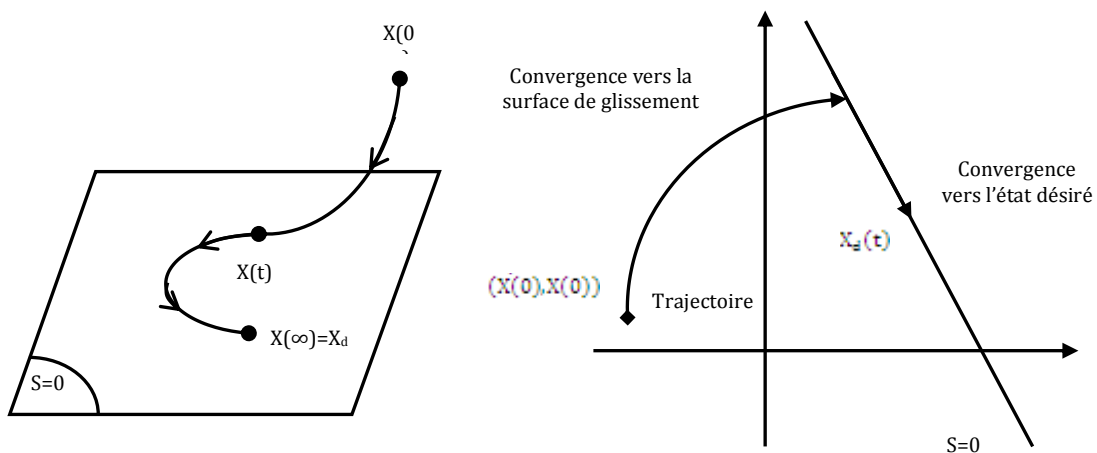


Figure III. 1: Convergence du système glissant

III.3. Synthèse de la commande par mode glissant :

Considérant un système non linéaire décrit par :

$$\overset{(n)}{x} = f(x,t) + g(x,t)u \quad \text{(III-1)}$$

Avec :

x : est le vecteur d'état

$f(x,t)$: est une fonction généralement non linéaire et non exactement connue.

$g(x,t)$: est une fonction de commande non exactement connue.

Le but du contrôle de la poursuite est de trouver une loi de commande tel que, étant donné une trajectoire désirée $x_d(t)$, l'erreur de poursuite $x_d(t) - x(t)$ tend vers zéro malgré la présence des perturbations.

L'erreur de poursuite est définie par :

$$e(t) = x_d(t) - x(t) \quad \text{(III-2)}$$

La mise en œuvre d'une commande par mode glissant passe par trois étapes :

III.3.1. Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme ; en fonction de l'application et de l'objectif visé [36]. Slotine [35] a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase dans le but d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_d cette fonction est donnée par l'équation :

$$S(x,t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{r-1} . e(x) \quad \text{(III-3)}$$

Ou :

λ : est un constant positif

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour :

- $r=1$: $S(x) = e(x)$
- $r=2$: $S(x) = \lambda e(x) + \dot{e}(x)$
- $r=3$: $S(x) = \lambda^2 e(x) + 2\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

Pour $r>1$, $S(x)=0$ est une équation différentielle linéaire dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ .

Une fois la fonction de commutation est établie le problème de la poursuite nécessite la conception d'une loi de commande tel que le vecteur d'état $e(t)$ reste sur la surface de glissement $s(x,t) = 0$ pour tout $t \geq 0$.

III.3.2. Condition d'existence et convergence d'une surface de glissement

Les problèmes de la poursuite du vecteur x_d ou le maintien de S à zéro, peuvent être résolus en considérant la fonction de Lyapunov suivante [37] :

$$V(s) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III-4})$$

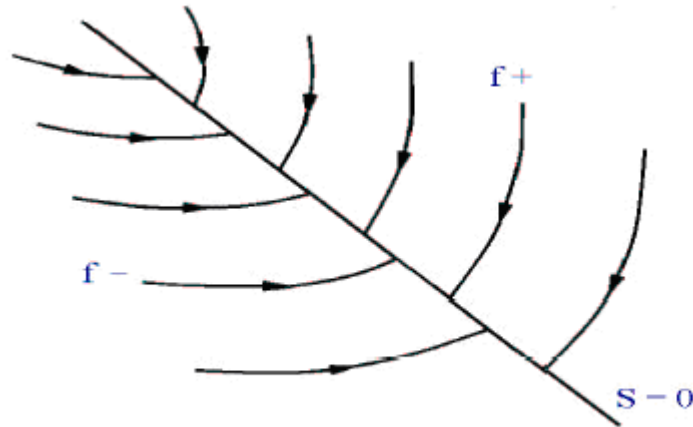


Figure III. 2 : Attractivité de la surface

Et de déterminer une loi de commande qui soit capable de satisfaire la condition :

$$\dot{V}(S) = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (\text{III-5})$$

Où η est une constante strictement positive. Cette condition est appelée condition d'attractivité.

III.3.3. Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre (origine du plan de phase) en maintenant la condition d'existence du mode de glissement.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structures variables pour la commande par mode de glissement est que la commande doit commuter entre u_{\max} et u_{\min} instantanément (fréquence infinie) en fonction du signe de la surface de glissement (figure III .3).

Dans ce cas des oscillations de très forte fréquence appelée « Chattering » apparaissent dans le mode de glissement et le régime permanent. [38]

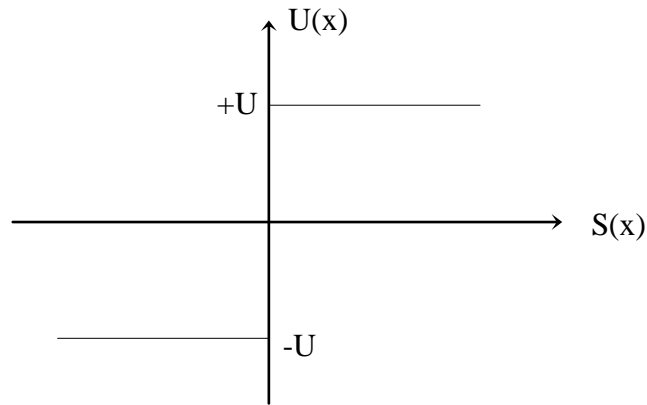


Figure III. 3 : Commande appliquée au système

III.3.3.1. Définition des grandeurs de commande

La structure d'un contrôleur comporte deux parties, une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante. Cette dernière est très importante dans la technique de commande non linéaire car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures. Nous posons;

$$u = u_{eq} + u_{gli} \quad (III-6)$$

u_{eq} : correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Cette commande est considérée comme la plus directe et la plus simple. Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par :

$$\dot{S}(x) = 0 \quad (III-7)$$

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne (continue) que prend la commande lors de la commutation rapide entre u_{max} et u_{min} (figure III.4).

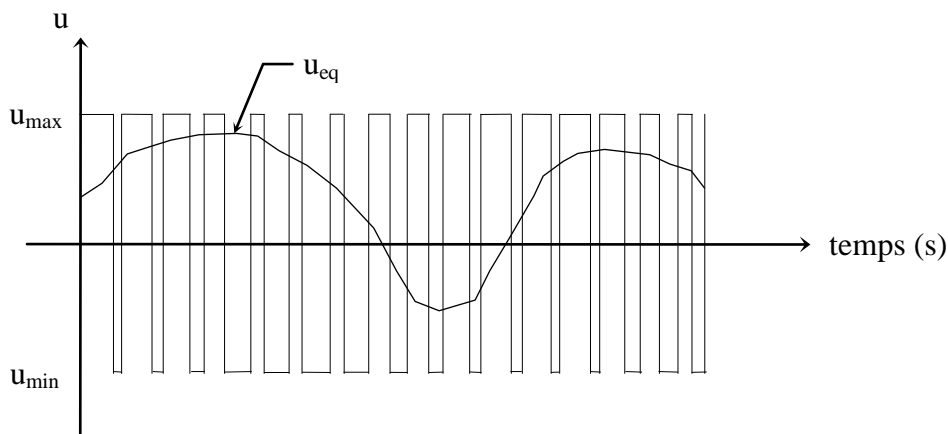


Figure III. 4 : Valeur continue u_{eq} prise par la commande lors des commutations entre u_{min} et u_{max}

La commande u_{gli} est déterminée pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers la surface et satisfait la condition de convergence $\dot{V}(S) = S\dot{S} \leq -\eta|S|$

En d'autres termes, elle définit le comportement dynamique du système durant le mode de convergence.

III.3.3.2. Expressions analytiques de la commande

Considérons le système suivant :

$$\dot{x} = f + g u \quad (\text{III-8})$$

Le vecteur u est composé de deux grandeurs u_{eq} et u_{gli} .

Nous nous intéressons à déterminer les expressions analytiques de ces grandeurs. Dans un premier temps nous nous occupons du calcul de la commande équivalente à partir des équations du système, ensuite du calcul de l'autre composante qui définit la dynamique du système.

Nous avons :

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad \Rightarrow \quad \dot{S} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + \lambda \dot{e} \quad (\text{III-9})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, l'expression de la surface est égale à zéro, sa dérivée est donc nulle, nous avons :

$$u_{gli} = 0 \quad (\text{III-10})$$

Et nous remplaçons \ddot{x} par sa valeur qui donne :

$$u_{eq} = \hat{g}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_d + \lambda \dot{e}) \quad (\text{III-11})$$

Ou :

$$0 < g_{\min} < g < g_{\max} \quad (\text{III-12})$$

On choisit \hat{g} comme étant la moyenne géométrique $\hat{g} = \sqrt{g_{\min} \cdot g_{\max}}$ de l'équation (III.12) on peut écrire :

$$\beta^{-1} \leq \frac{\hat{g}}{g} \leq \beta \quad (\text{III-13})$$

Ou : $\beta = \sqrt{\frac{g_{\max}}{g_{\min}}}$ qui caractérise la marge de gains du système.

Le régime idéal n'est pratiquement jamais réalisable. On doit faire usage du deuxième terme de la commande pour ramener l'état du système vers la surface à chaque fois qu'il s'en écarte.

Ainsi, il convient de prendre [37] :

$$u_{gli} = -\hat{g}^{-1} \cdot (k \cdot \text{sign}(S)) \quad (\text{III-14})$$

Sign est la fonction signe classique ;

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} +1, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ -1, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

k : Constant positif

Donc ; la loi de commande est :

$$u = \hat{g}^{-1} \cdot [\hat{u} - k \cdot \text{sgn}(S)] \quad (\text{III-16})$$

Avec :

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d + \lambda \cdot \dot{e} \quad (\text{III-17})$$

$$S = \dot{e} + \lambda \cdot e \quad (\text{III-18})$$

\hat{f} : La valeur estimée de f

La stabilité est garantie si $S\dot{S} \leq -\eta|S|$

On a :

$$\dot{S} = (f - g\hat{g}^{-1} \cdot \hat{f}) + (1 - g\hat{g}^{-1}) \cdot (-\ddot{x}_d + \lambda \cdot \dot{e}) - g\hat{g}^{-1} \cdot k \cdot \text{sgn}(S) \quad (\text{III-19})$$

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \Rightarrow k \geq \hat{g}g^{-1}F + \eta\hat{g}g^{-1} + |\hat{g}g^{-1} - 1| \cdot |\hat{f} - \ddot{x}_d + \lambda \cdot \dot{e}| \quad (\text{III-20})$$

$$\Rightarrow k \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1) \cdot |\hat{u}| \quad (\text{III-21})$$

Avec :

$$|f - \hat{f}| \leq F \quad (\text{III-22})$$

III.4. Le phénomène de 'chattering'

Les trajectoires du système lors de la phase de glissement idéal sont des fonctions continues ne dépendant que de la surface de commutation choisie. Ces trajectoires correspondent au système commandé par un retour statique appelé contrôle équivalent. Cependant, du fait des imperfections technologiques (retard, hystérésis) des actionneurs et des capteurs, le contrôle discontinu ne peut pas osciller idéalement à une fréquence infinie. Alliée

aux retards négligés lors de la modélisation du processus physique, la commande discontinue engendre alors une dynamique parasite appelée communément “*chattering*” en anglais, ou phénomène de broutement en français. Celle-ci se caractérise par des oscillations persistantes et à hautes fréquences de la commande (voir figure III.5).

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

Plusieurs techniques ont alors été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Les solutions par limitation de la condition de glissement sont les plus utilisées dans les applications en temps réel [39].

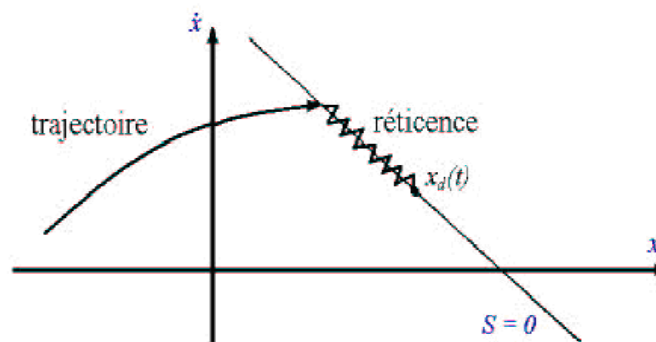


Figure III. 5 : Phénomène de chattering

Dans cette section nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement. Ces techniques sont basées sur la définition d’une zone autour de la surface S , à l’intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la condition signe est appliquée. Ainsi, le terme $\text{sign}(S)$ dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce, par exemple :

- La forme proposée par Slotine : Dans cette approche, la fonction signe, dans le voisinage de la surface de commutation, est remplacée par une fonction appelée « $\text{sat}(S)$ », telle que :

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} \frac{S}{\Phi} & \text{si } |S| \leq \Phi \\ \text{sign}(S) & \text{si } |S| > \Phi \end{cases} \quad \text{(III-23)}$$

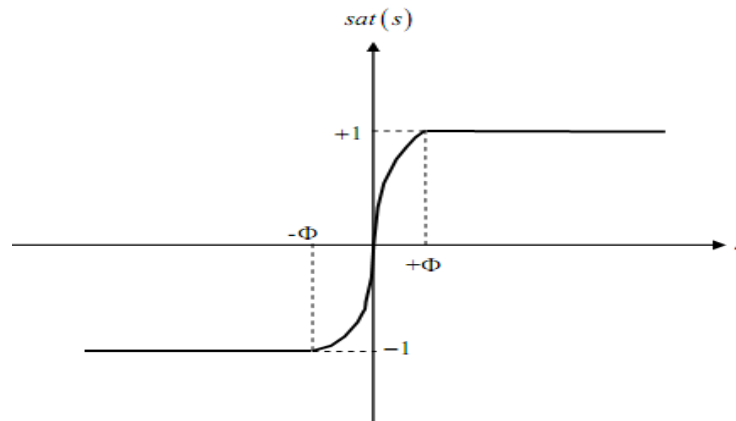


Figure III. 6 : Fonction de saturation sat

- Dans le même souci, une autre méthode est proposée. Dans celle-ci, la fonction signe est remplacée par une fonction de lissage appelée « cont(S) », avec :

$$cont(S) = \begin{cases} \frac{S}{|S| + \sigma} & \text{si } |S| \leq \Phi \\ sign(S) & \text{si } |S| > \Phi \end{cases} \quad \text{avec } \sigma > 0 \quad (\text{III-24})$$

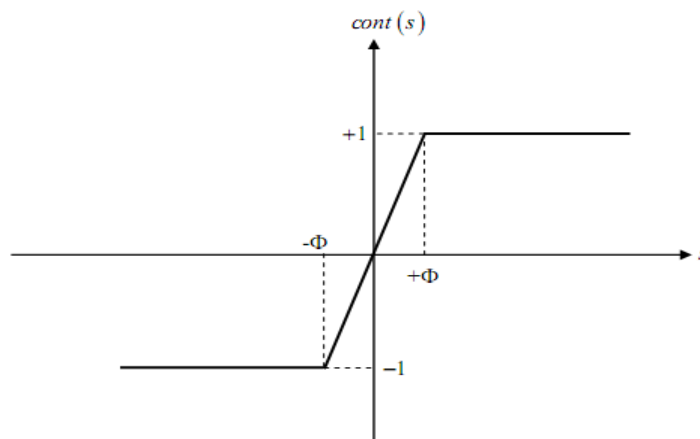


Figure III.7 : Fonction de saturation cont

III.5. Différentes structures du contrôle par mode de glissement

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple ou la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui – même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Enfin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'origine de commande avec ajout de la 'commande équivalente'. Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude [39].

III.5.1. Structure par commutation au niveau de l'origine de commande

Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné sur la figure (III .8.) Cette structure de commande est la plus classique et la plus utilisée.

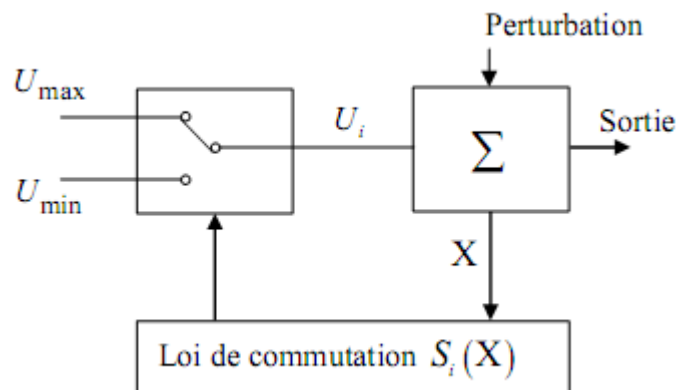


Figure III. 8 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

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

III.5.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure III.9. D'après les études menées précédemment, c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation

de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction. Un ouvrage a été consacré à ce type de commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du :

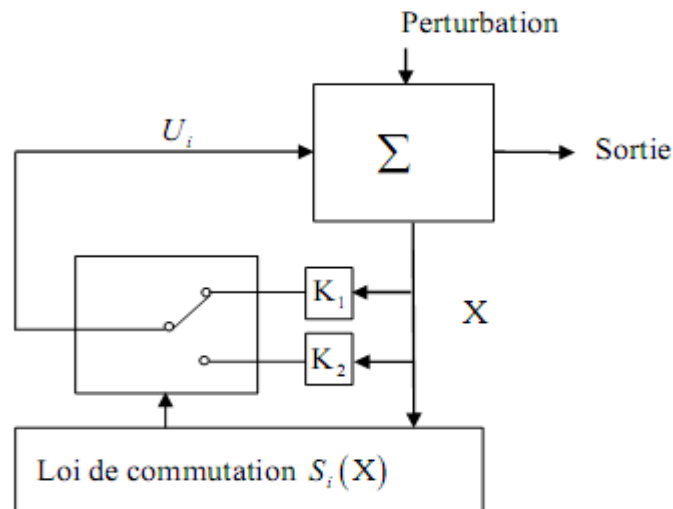


Figure III. 9 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

III.5.3. Structure de régulation avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montrée sur la figure III.10, présente un réel avantage. Elle permet de prépositionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [39].

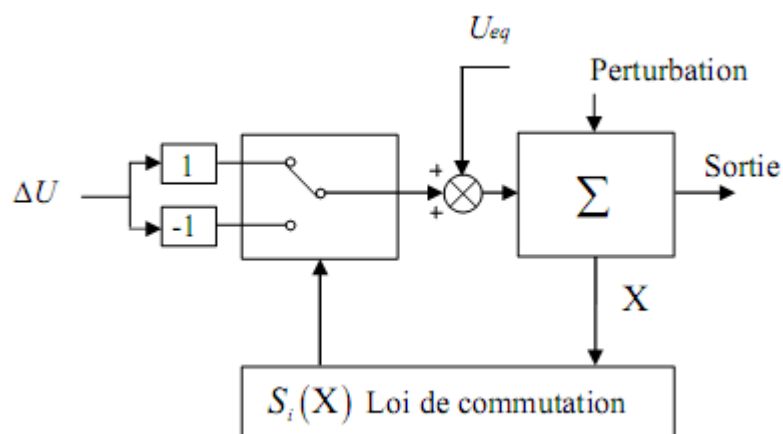


Figure III. 10 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.

III.6. Application de la commande par mode de glissement au PMA

Ces dernières années, beaucoup d'effort de recherches a été consacré aux applications des techniques de commande par les modes glissants aux équipements électroniques et aux commandes électriques. L'intérêt pour cette approche de commande est dû à sa robustesse aussi, elle est apte à éliminer les effets des variations paramétriques même en régime dynamiques avec un minimum de complexité de la loi de commande [40], [41].

L'équation de notre système est donnée par :

$$F - m \cdot G = m \cdot \ddot{y} \quad \text{(III-25)}$$

$$F = K \cdot \left[\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right] \quad \text{avec: } K = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \quad \text{(III-26)}$$

Dans notre cas $G = 0$.

III.6.1. Le choix de la surface

La fonction de la surface pour un système de deuxième ordre donne :

$$S = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right) . e = \dot{e} + \lambda . e \quad \text{(III-27)}$$

III.6.2. Condition de convergence

Basons sur le théorème de stabilité de Lyapunov, la conditions de glissement pour la stabilité peut être défini par la forme :

$$\dot{V}(S) = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad \text{(III-28)}$$

III.6.3. Calcul de la commande

La dérivation de l'équation de la surface donne :

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda.\dot{e} \quad (\text{III-29})$$

Nous remplaçant \ddot{y} par sa valeur dans l'équation (III.29), il vient :

$$\dot{S} = \ddot{y}_d - \ddot{y} + \lambda.\dot{e} = -\frac{1}{m}.F + \ddot{y}_d + \lambda.\dot{e} \quad (\text{III-30})$$

On suppose que le constant K de l'équation de force (III.26) est incertain. Ce paramètre incertain est extrait à partir du F :

$$\dot{S} = -\frac{k}{m}F_K + \ddot{y}_d + \lambda.\dot{e} \quad (\text{III-31})$$

Ou : $F_K = \frac{F}{K}$. On pose $\frac{K}{m} = g$ et F_K nominal = \hat{F}_K , pour $\dot{S} = 0$:

$$\hat{F}_K = \hat{g}^{-1}(\ddot{y}_d + \lambda.\dot{e}) \quad (\text{III-32})$$

On suppose que g peut être lié par l'inégalité :

$$0 < g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \quad (\text{III-33})$$

On choisit \hat{g} comme étant la moyenne géométrique $\hat{g} = \sqrt{g_{\min} g_{\max}}$ de l'équation (III.33). On peut écrire :

$$\beta^{-1} \leq \frac{\hat{g}}{g} \leq \beta \quad (\text{III-34})$$

Ou :

$$\beta = \sqrt{\frac{g_{\max}}{g_{\min}}}$$

Le contrôleur de mode glissant suivant est obtenu en ajout un terme de discontinuité à l'équation (III.32) :

$$F_k = \hat{g}^{-1}(\ddot{y}_d + \lambda.\dot{e} - \xi.\text{sat}(S/\phi)) \quad (\text{III-35})$$

ξ : Gain de la commande tel que :

$$\xi \geq (\beta - 1)|\ddot{y}_d + \lambda \dot{e}| + \beta \eta \quad \text{(III-36)}$$

La commande de notre système est donnée par :

$$i = \begin{cases} [-I_o.(Co^2 + y^2) + (Co^2 - y^2).\sqrt{I_o^2 + F_k.y.Co.}] & \text{si } y \neq 0 \\ i = F_k.Co^2 / 4.I_o & \text{si } y = 0 \end{cases} \quad \text{(III-37)}$$

Avec :

$$-\frac{4.I_o^2}{(Co + y)^2} \leq F_k \leq \frac{4.I_o^2}{(Co - y)^2} \quad \text{(III-38)}$$

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref rappel sur la commande par les modes glissants. Les principes ont été donnés dans le cas des régimes glissants classiques : notion de surface invariante de commande équivalente et conditions d'existence.

Nous avons appliqué les modes de glissement à la commande du palier magnétique actif dans le but de régler le déplacement de ce palier [42], [43].

Chapitre IV

Analyse et comparaison des résultats de simulations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'application des deux techniques de commande précédemment développées à savoir la commande par mode de glissement et la commande par la logique floue une analyse détaillée des résultats est nécessaire afin de faire une comparaison entre les différentes commandes et déterminer l'apport de chacune d'elles avec ces avantages et ces inconvénients [44], [45],[46].

IV.2. Exemple de dimensionnement d'un PMA

Afin d'avoir un modèle numérique du PMA nous avons choisi les valeurs des paramètres comme suit :

μ_o	S (m ²)	N	m (kg)	I_o (A)	C_o (m)	i_o, y_o
$4\pi \times 1e-7$	920.28e-6	100	8.5	35e-3	1e-3	(0,0)

Tableau IV. 1 : Valeurs des paramètres

IV.2.1. Réponse du système en boucle ouverte

Dans le cas où il n'y a aucune perturbation externe au système et lorsqu'on choisit un courant d'entrée du système en boucle ouverte $i = 0$ et les conditions initiales du système nulles alors la sortie du système est théoriquement nulle et le système est à son point d'équilibre critique. Par ailleurs, dans la pratique on ne peut pas avoir une condition initiale de position absolument nulle. Alors nous avons simulé la réponse du système en boucle ouverte avec une condition initiale de position égale à -0.1% de l'entrefer. Le résultat de simulation est consigné par la figure IV.1. Nous constatons clairement la divergence du système en boucle ouverte.

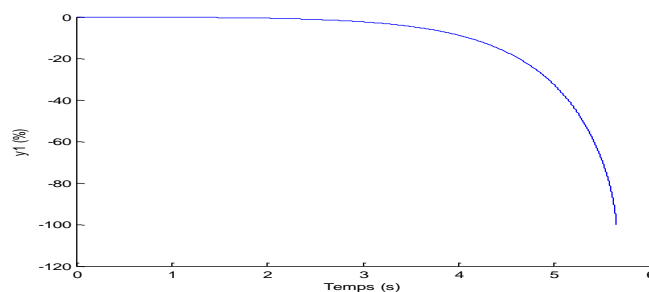


Figure IV. 1 : Réponse du PMA en boucle ouverte

IV.2.2. Stabilisation du PMA à l'aide d'un PID

Afin de stabiliser le PMA nous avons utilisé un régulateur conventionnel PID filtré représenté dans la figure IV.2. C'est un régulateur composé des actions pures, proportionnelle intégrale et dérivée plus un filtre de premier ordre. L'expression du régulateur est donnée par l'équation IV.1.

$$G_c(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \cdot s \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{T_d}{N} \cdot s} \quad (\text{IV-1})$$

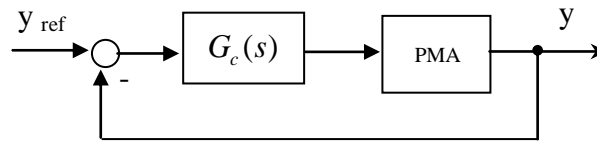


Figure IV. 2 : Schéma bloc du PMA en boucle fermée

Pour calculer les gains du régulateur on utilise une méthode d'approche rapide, consiste à prendre $T_i \approx T/10$ et $T_d \approx T_i/4$ avec T : la constante de temps dominante du processus .et on choisit généralement N de l'ordre de 10.

Les résultats de simulations du PMA en boucle fermée avec le régulateur PID filtré ($K_p=280$, $T_i=8$, $T_d=2$, $N=10$) et $y_{ref} = 30\%$ sont consignés dans les figures (IV.3) . Nous constatons que le palier magnétique actif est actuellement stable en boucle fermée. Nous avons choisi une consigne de 30 % parce que c'est une limite max au-delà de cette valeur le PMA perd sa stabilité.

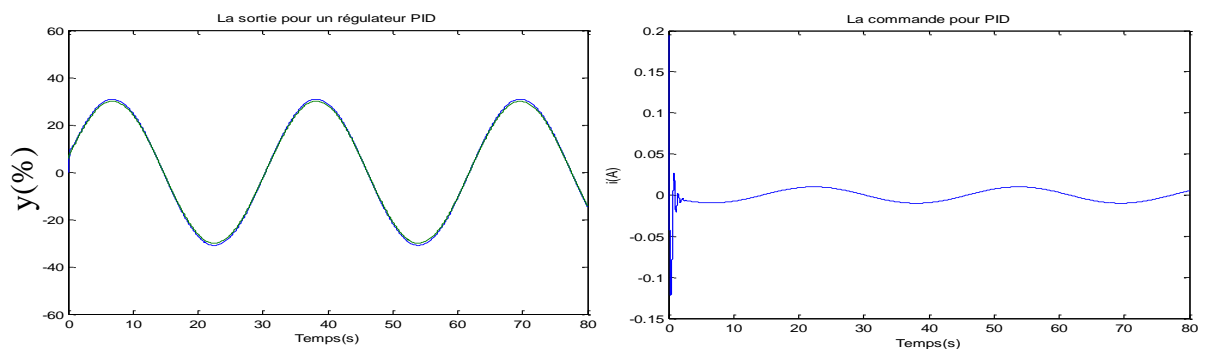
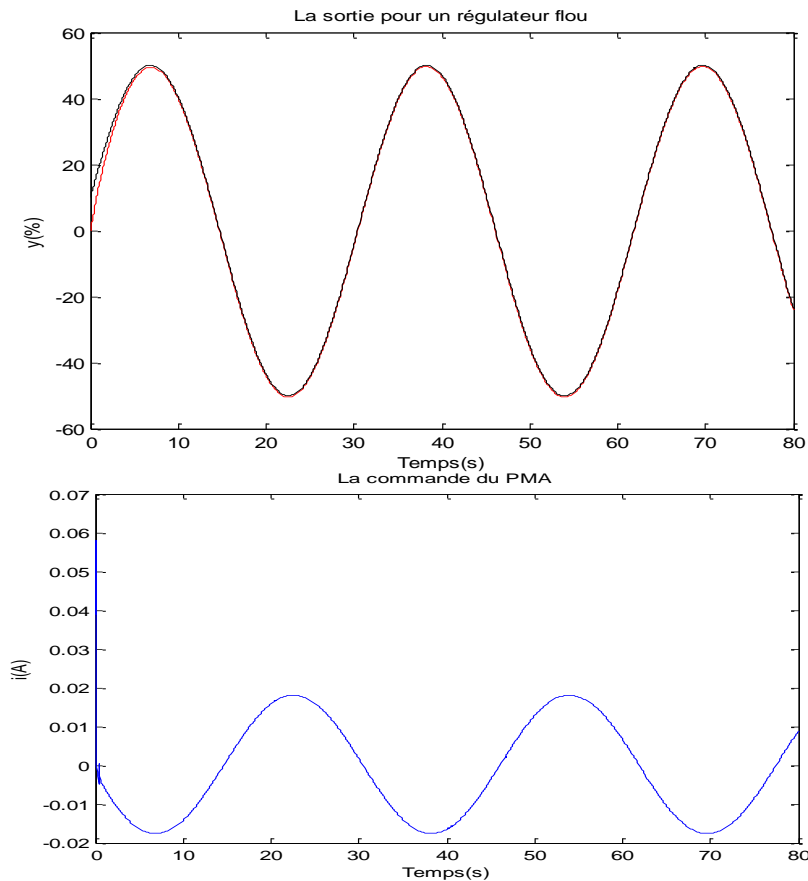


Figure IV. 3 : Sortie et commande du PMA en boucle fermée

IV.3. Application des commandes au PMA

➤ Commande par la logique floue

En imposant une consigne sinusoïdale avec d'amplitude 50 % de l'entrefer et de fréquence 0.03 Hz on obtient les résultats donnés par la figure (IV.4). Ces résultats présentent l'évolution de la sortie (le déplacement) et la grandeur de la commande. On remarque bien que le déplacement suit bien sa référence.

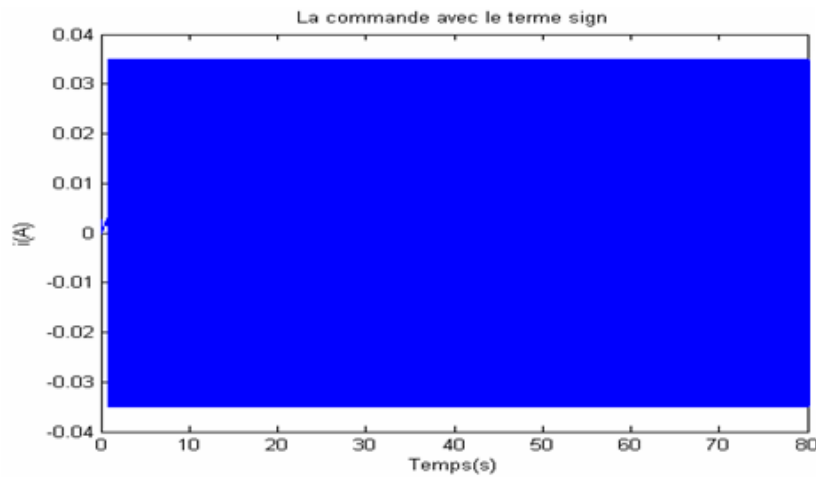
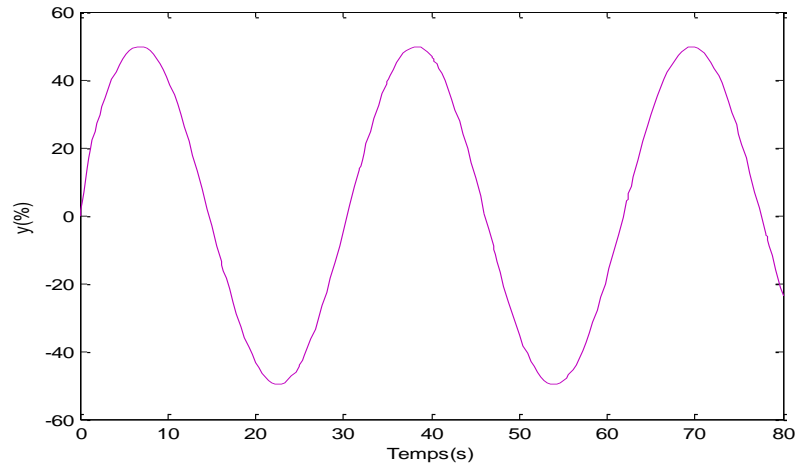


b) : Commande du PMA

Figure IV. 4 : Application de la logique floue au PMA (sans présence de perturbation)

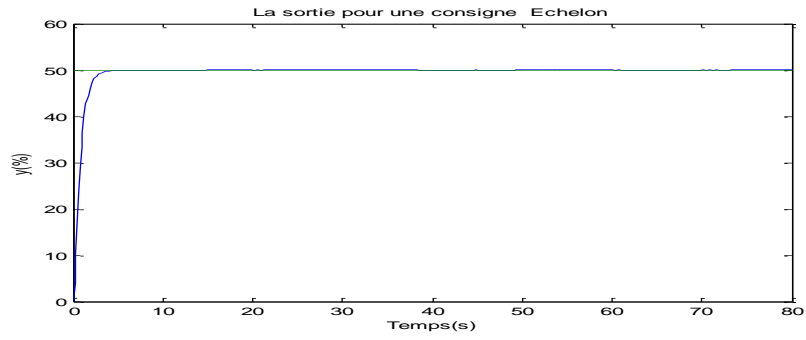
➤ Commande par mode de glissement

Pour la même consigne de déplacement définie précédemment, on obtient les résultats présentés par la figure (IV.5). Ces résultats montrent que le déplacement suit bien sa référence alors que la commande présente de fortes oscillations. Il s'agit du phénomène de chattering dû au terme discontinue dans l'expression de la commande.

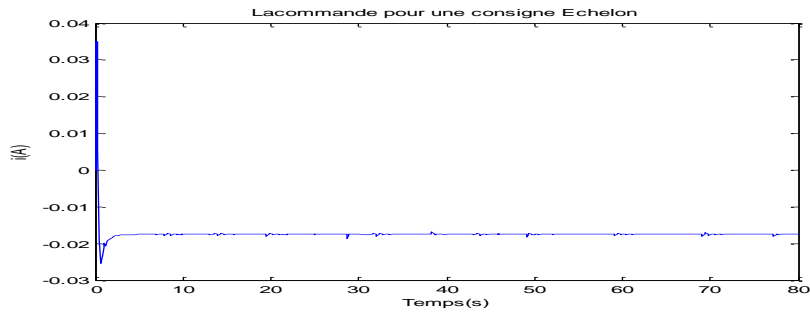


b) : Commande du PMA
Figure IV. 5 : application du MG au PMA (sans présence de perturbation)

Afin d'éliminer les broutements de la commande, nous avons remplacé le terme $sign(s)$ par $sat(S/\phi)$. La figure (IV.6) montre la réponse du PMA dans le cas d'une consigne en échelon. Les mêmes résultats sont présentés par les figures (IV.7) avec une consigne de forme sinusoïdale. On constate bien l'absence des broutements dans les grandeurs de commande.

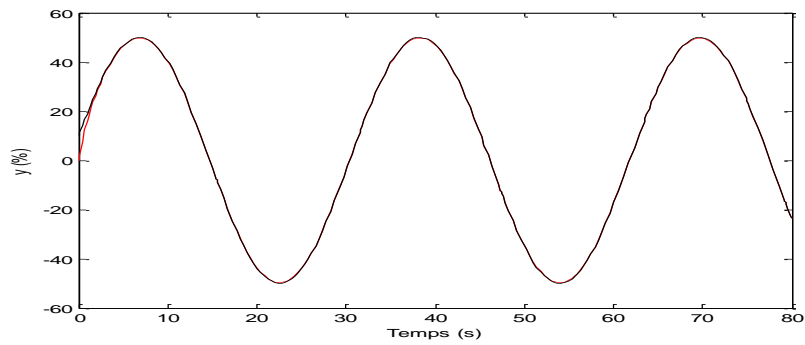


a) : Sortie du PMA

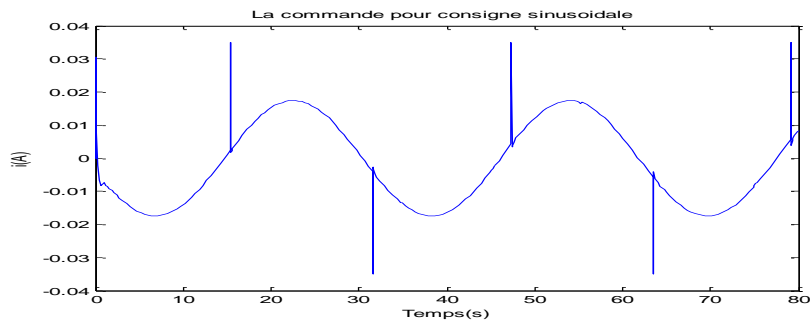


b) : Commande du PMA

Figure IV. 6: application du MG au PMA (sans présence de perturbation)



a): Sortie du PMA



b) : Commande du PMA

Figure IV. 7: application du MG au PMA (sans présence de perturbation)

IV.4. Influence de l'augmentation de la consigne

➤ Commande par la logique floue

Cette simulation va nous permettre de voir la capacité de pour suite de la référence de cette commande. En premier lieu nous allons augmenter l'amplitude de la consigne sinusoïdale et voir le comportement de la sortie du PMA dans le cas d'un régulateur flou.

En analysant les résultats de simulation obtenus, représentés par la figure (IV.8) nous constatons que la commande est capable d'assuré une pour suite efficace de la consigne jusqu'aux 89% de la plage de l'entrefer sans que le système perde sa stabilité.

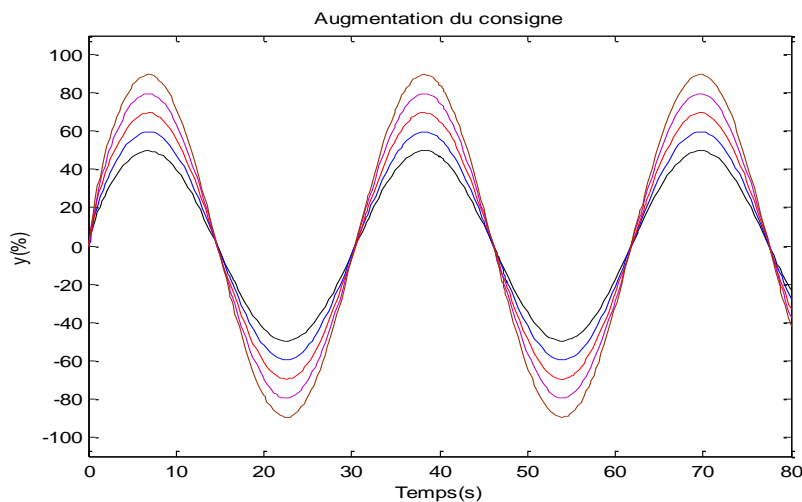


Figure IV. 8 : Réponse du PMA à plusieurs consignes cas d'un régulateur flou

➤ Commande par mode de glissement

Avec cette commande il est possible d'augmenter l'amplitude de la consigne jusqu'au 95% de la plage de l'entrefer sans que le système perd sa stabilité .Comme le montre la figure (IV .9)

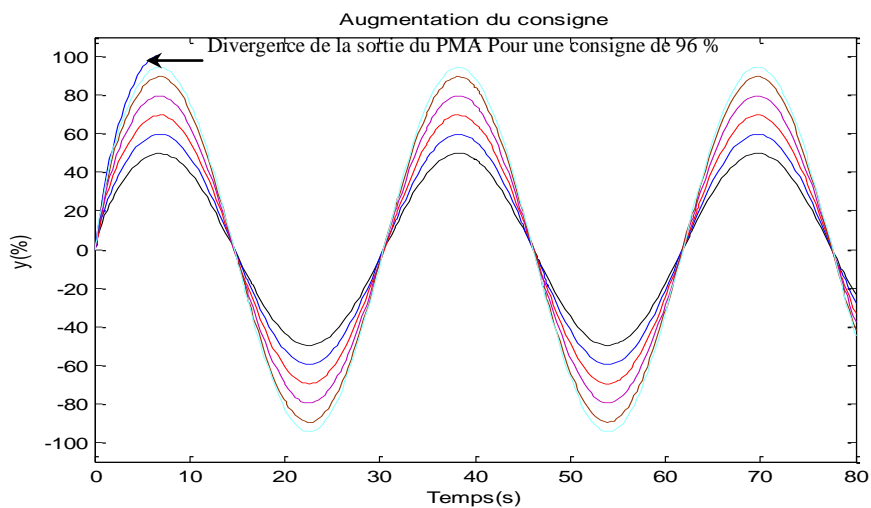


Figure IV. 9: Réponse du PMA à plusieurs consignes cas d'un régulateur MG

IV.5. Etude comparative

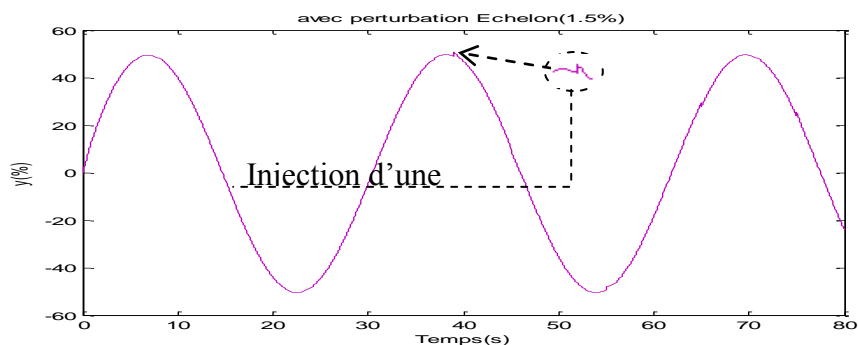
a) En absence de perturbations

Les résultats de simulation donnés par les figures (IV.8) et (IV.9) sont réalisés avec un PMA non perturbé. Nous constatons de ces résultats qu'il n'y a pas de grandes différences entre les réponses, du PMA commandé par la logique floue ou par le mode de glissement.

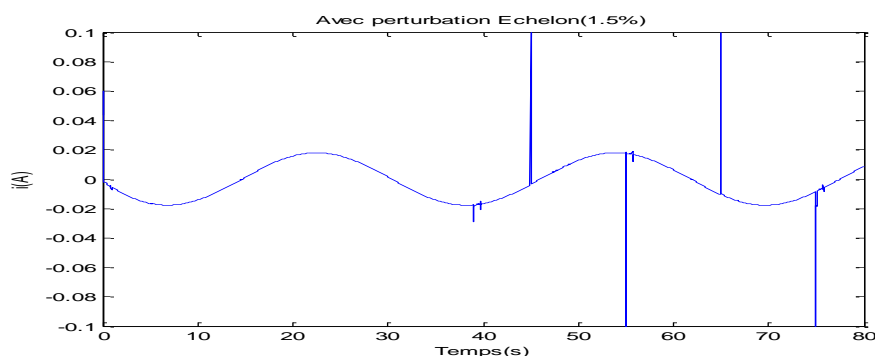
Toutes fois il faut noté une légère différence dans la phase de poursuite entre les deux tube de réglage. Pour une comparaison efficace nous devons voir la réponse du PMA en présence de perturbations.

b) En présence d'une perturbation en échelon

Dans ce cas nous appliquons une perturbation de forme carré de période égale à 20s et d'amplitude égale à 1.5% .Sur les courbes représentées par les figures (IV.10-11) on remarque que la perturbation est rejetée facilement par les deux régulateurs. Donc les deux régulateurs ont réussit à rejeter la perturbation et ils ont maintenue la stabilité du PMA.

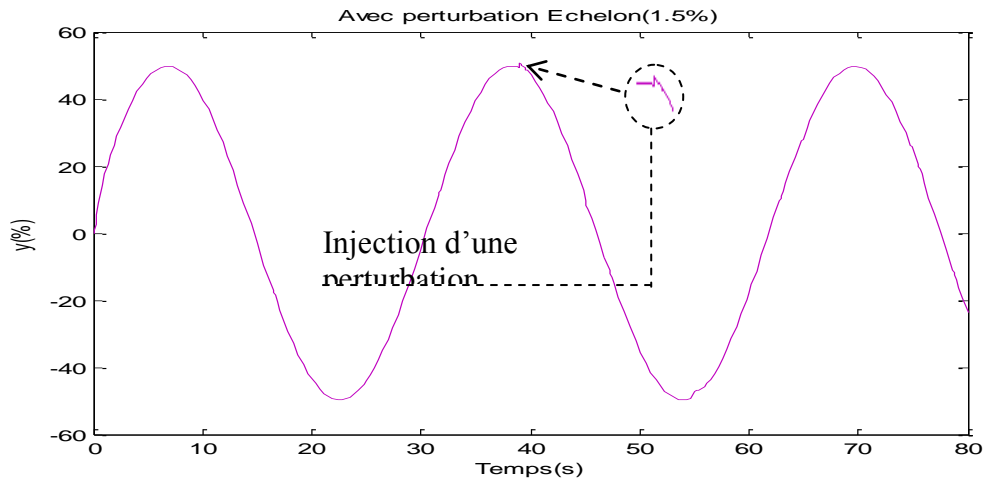


a) : Réponse du PMA

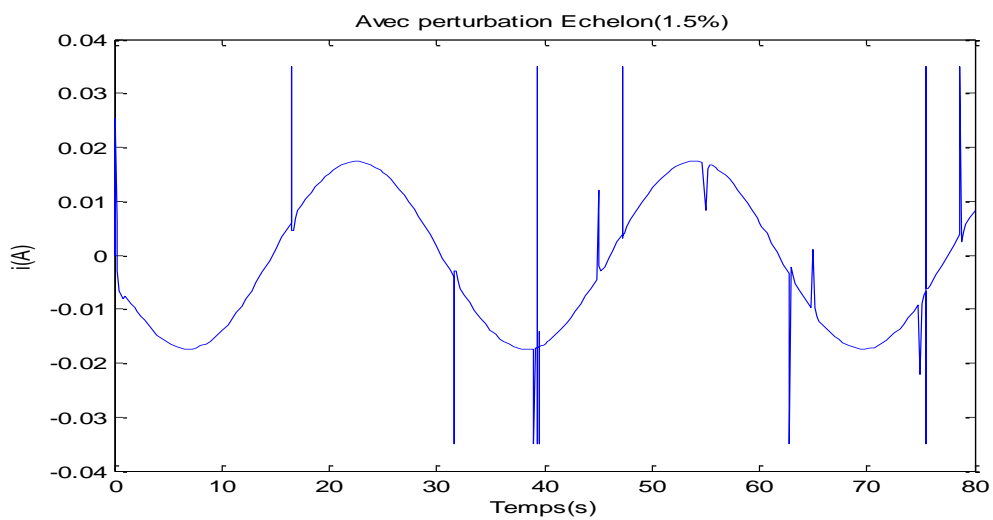


b) : Commande du PMA

Figure IV.10. 1a: application de la logique floue PMA (en présence de perturbation en échelon)



a) : Réponse du PMA



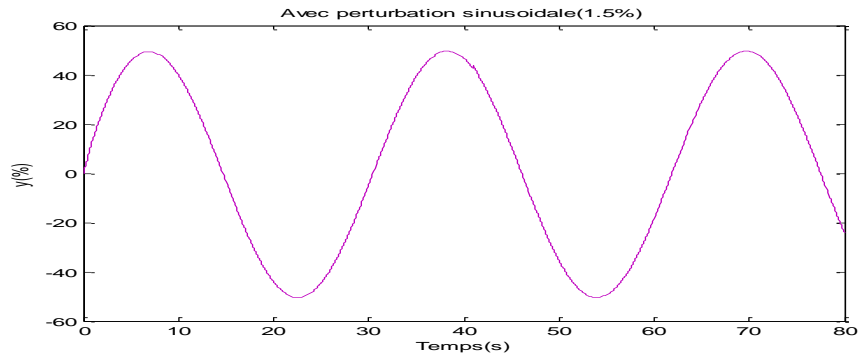
b) : Commande du PMA

Figure IV.11. 1a: application de MG PMA (en présence de perturbation en échelon)

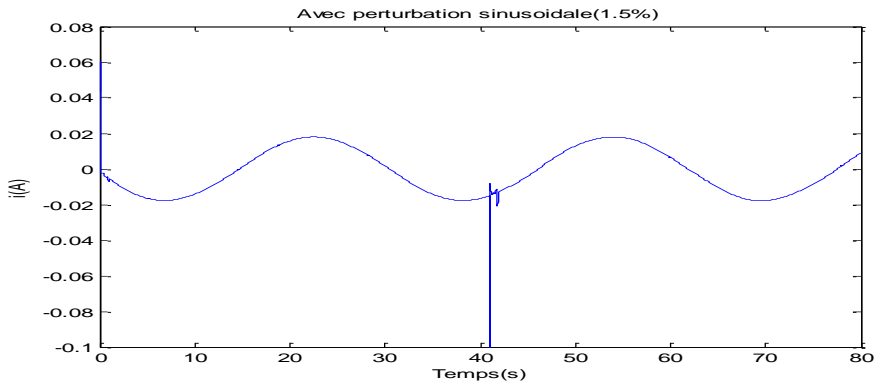
c) En présence d'une perturbation sinusoïdale

Maintenant ; nous appliquons une perturbation de forme sinusoïdale de fréquence égale à 0.8 rad/s et d'amplitude égale à 1.5 %. Sur les courbes représentées par les figures (IV.12-13) on constate que la perturbation est rejetée efficacement par les deux régulateurs.

On remarque que pour la même perturbation la poursuite de la consigne est bien pour les deux régulateurs ; la sortie converge vers la consigne.

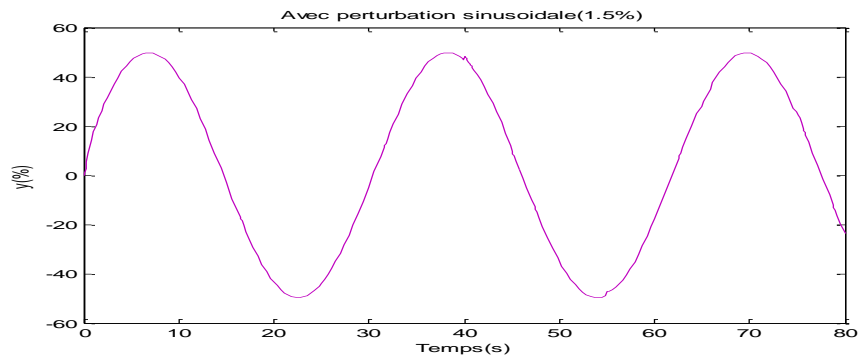


a) : Réponse du PMA

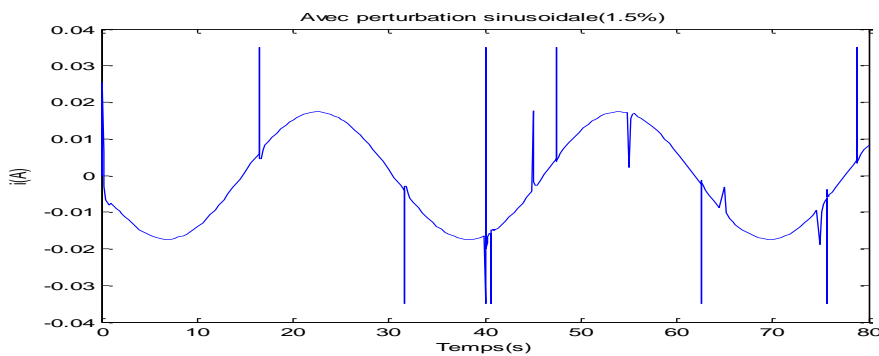


b) : Commande du PMA

Figure IV.12. 1a: application de la logique floue PMA (en présence de perturbation sinusoïdale)



a) : Réponse du PMA



b) : Commande du PMA

Figure IV.13. 1a: application de MG au PMA (en présence de perturbation sinusoïdale)

IV.6. Changement du point de fonctionnement :

Pour se la nous donnons les points (0% ; 0A) (15% ; -0.00525 A), et les résultats du simulation présentent par les figures (IV.14-17). Nous remarquons que pour ces points et pour les deux régulateurs la sortie converge vers la référence.

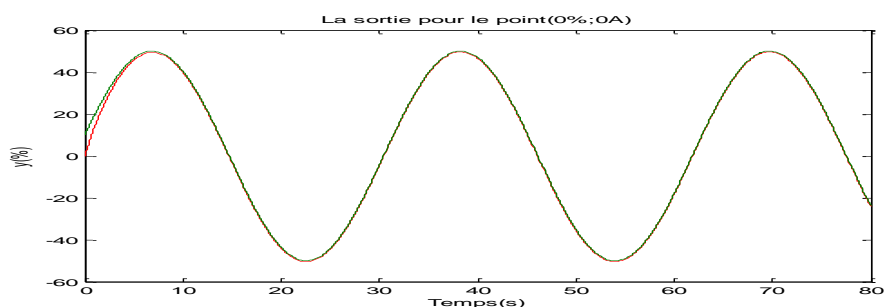


Figure IV. 14 : Réponse du PMA pour un régulateur flou (0% ; 0A)

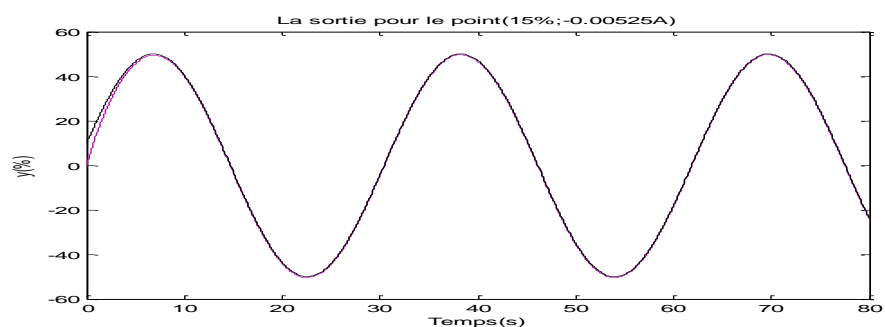


Figure IV. 15 : Réponse du PMA pour un régulateur flou (15% ; -0.00525A)

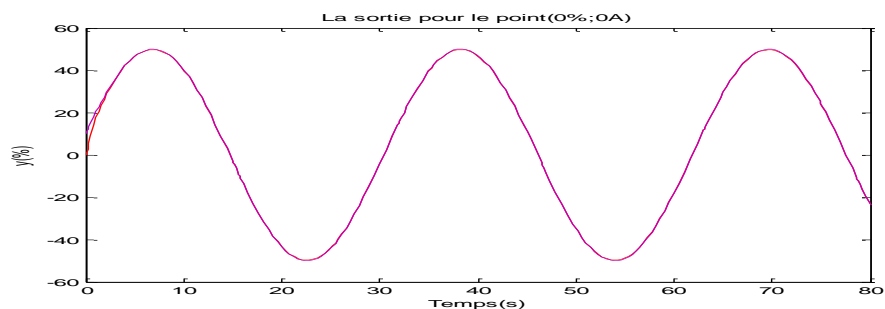


Figure IV. 16 : Réponse du PMA pour un régulateur par mode de glissement - (0% ; 0A).

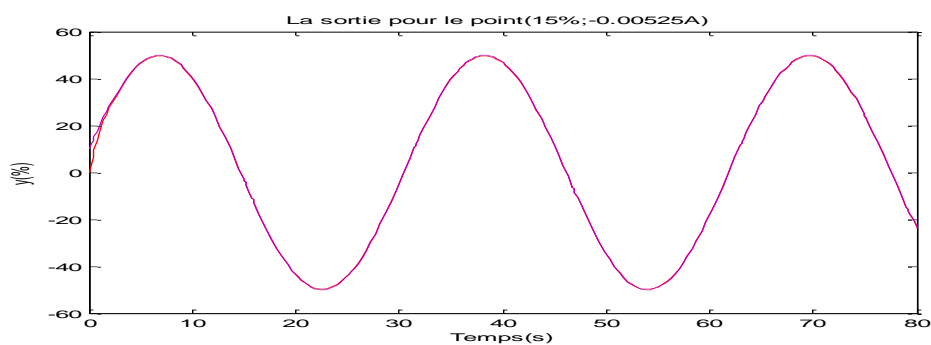
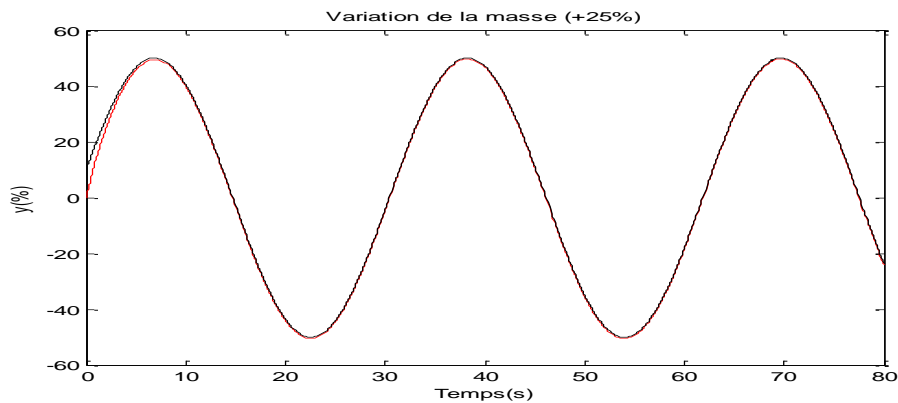


Figure IV. 17 : Réponse du PMA pour un régulateur par mode de glissement (15% ; -0.00525A)

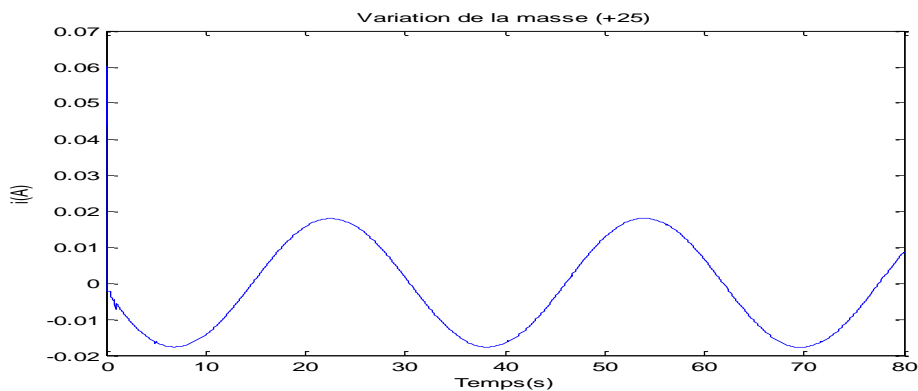
IV.7. Etude de la robustesse

L'objectif de cette partie est de voir la robustesse des commandes proposées face aux variations paramétriques. Dans la pratique les paramètres d'un PMA peuvent changer, citant l'exemple de l'augmentation de la masse du rotor suite aux dépôts de crasses qui s'entassent petit à petit au fil du temps, ou la diminution de la masse suite à l'érosion, aussi le cas d'un mauvais réglage du courant de pré-magnétisation. Il y en a d'autres exemples de variation paramétriques mais on va se contenter de ces exemples afin de tester la robustesse des deux commandes.

Les résultats de simulation illustrés par les figures (IV.18-21) montrent le comportement de la commande par la logique floue et les figures (IV. 22-25) celui de la commande par mode de glissement face à cette perturbation paramétrique. En observant ces résultats de simulation du PMA nous remarquons que à l'instant de la variation de la masse rien ne s'est produit, au niveau de la sortie pour les deux régulateurs et le système est resté stable dans les deux cas.

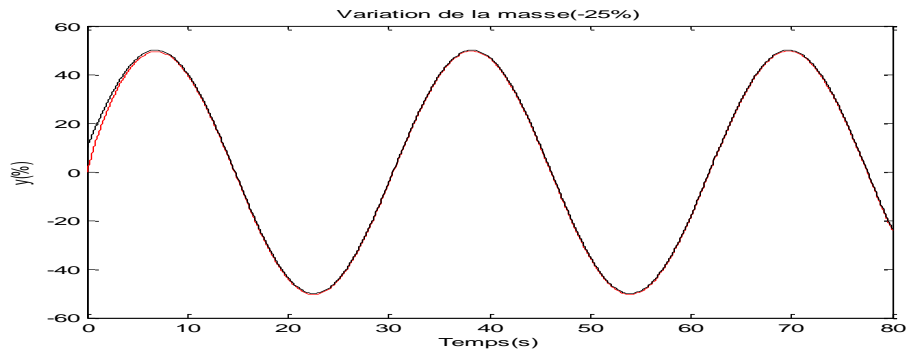


a) : Réponse du PMA

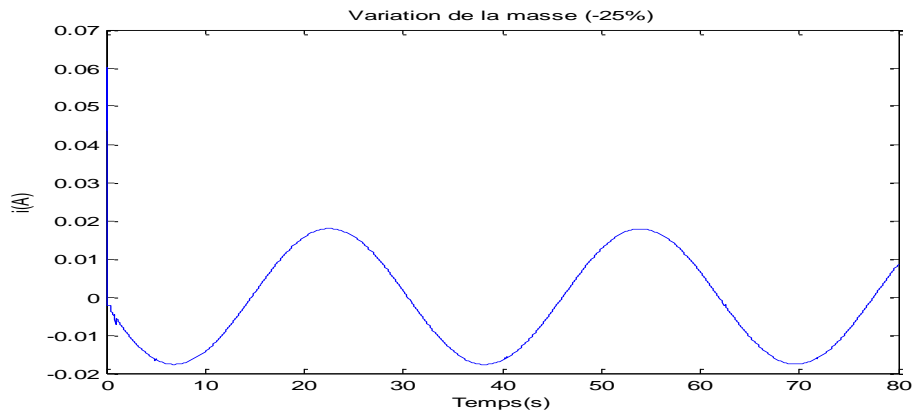


b) : Commande du PMA

Figure IV.18. 1a: réaction du régulateur flou à l'augmentation de la masse (+2 .125kg) à l'instant $t= 40s$

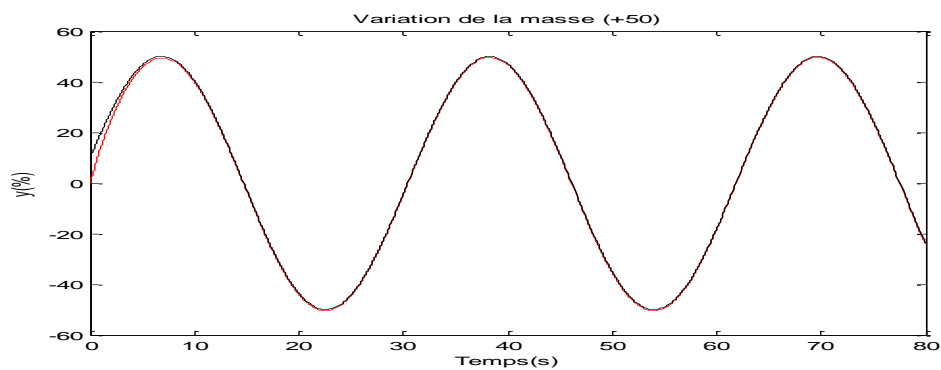


a) : Réponse du PMA

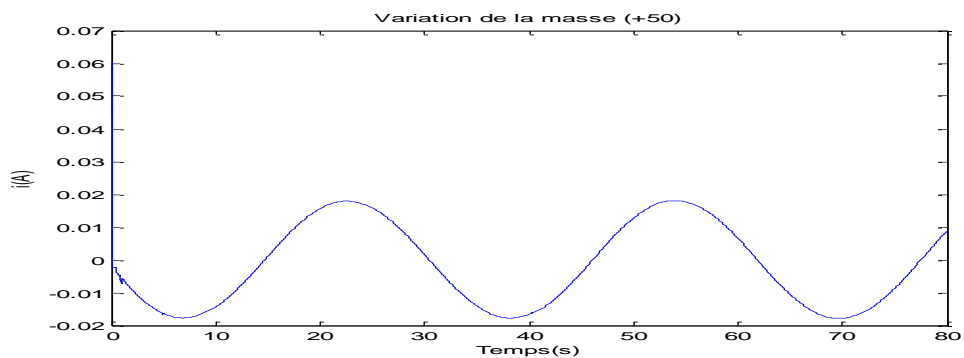


b) : Commande du PMA

Figure IV.19. 1a: réaction du régulateur flou à diminution de la masse (+2 .125kg) à l'instant $t= 40s$

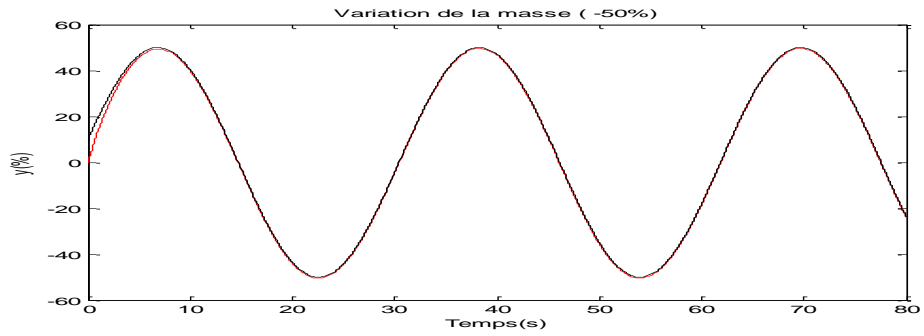


a) : Réponse du PMA

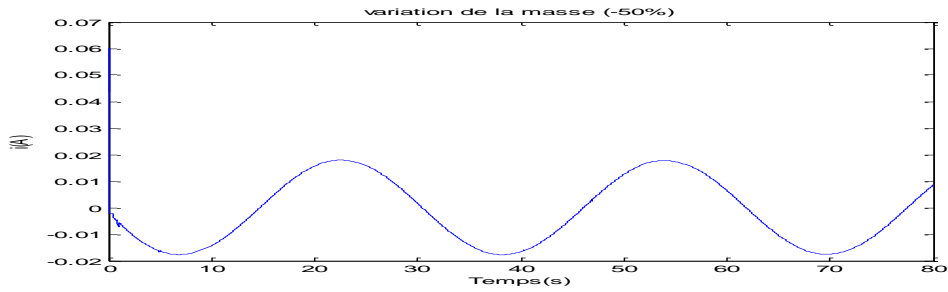


b) : Commande du PMA

Figure IV.20. 1a: réaction du régulateur flou à l'augmentation de la masse (+4 .5kg) à l'instant $t= 40s$

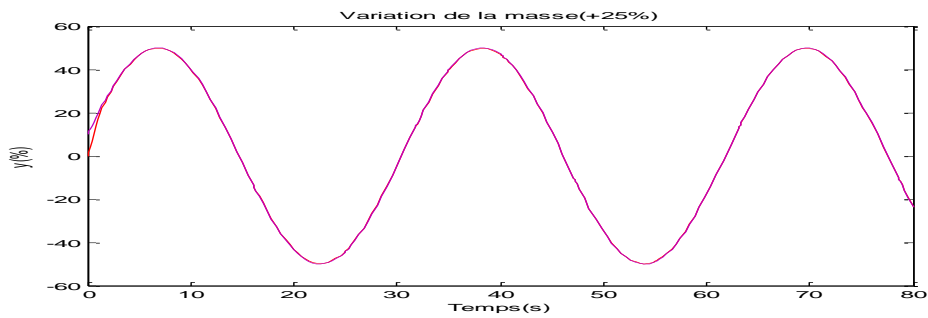


a) : Réponse du PMA

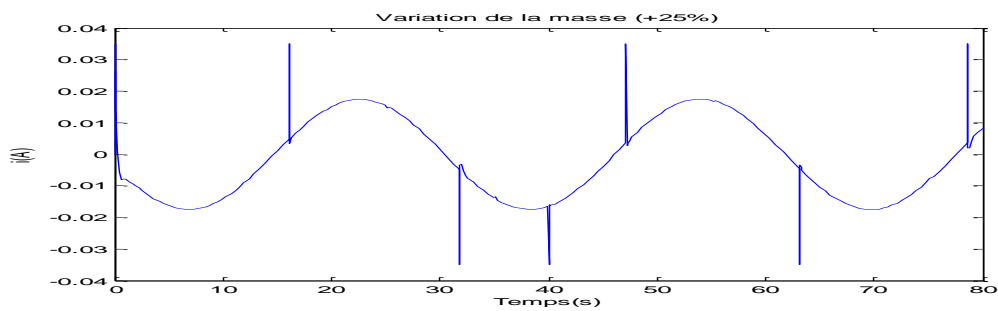


b) : Commande du PMA

Figure IV.21. 1a: réaction du régulateur flou à diminution de la masse (-4.5kg) à l'instant $t=40s$

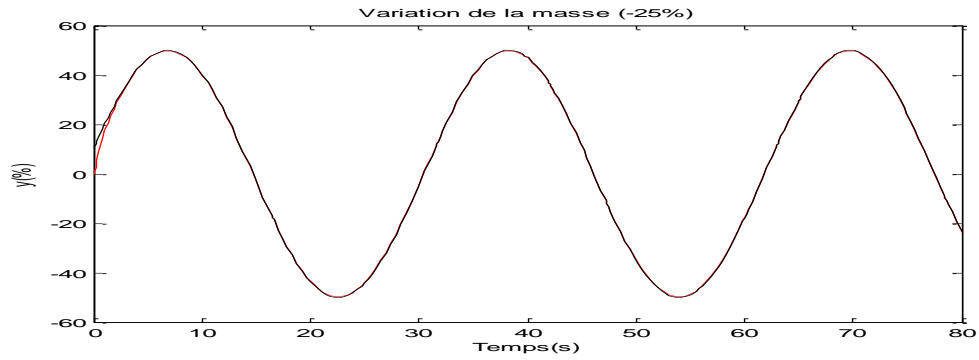


a) : Réponse du PMA

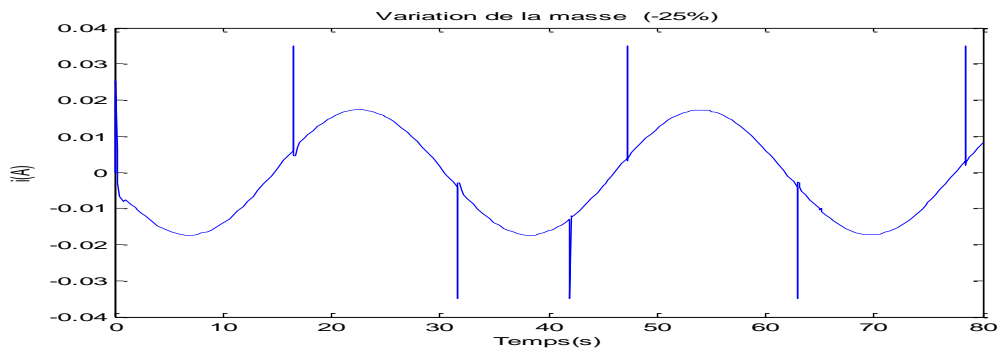


b) : Commande du PMA

Figure IV.22. 1a: réaction du régulateur par MG à l'augmentation de la masse (+2.125kg) à l'instant $t=41s$

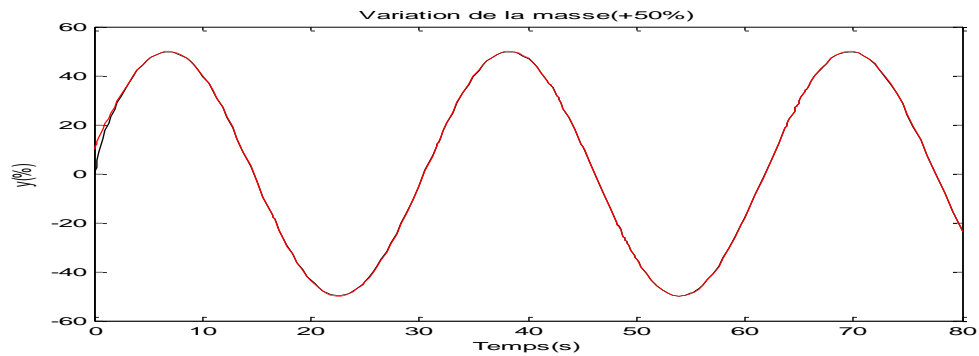


a) : Sortie du PMA

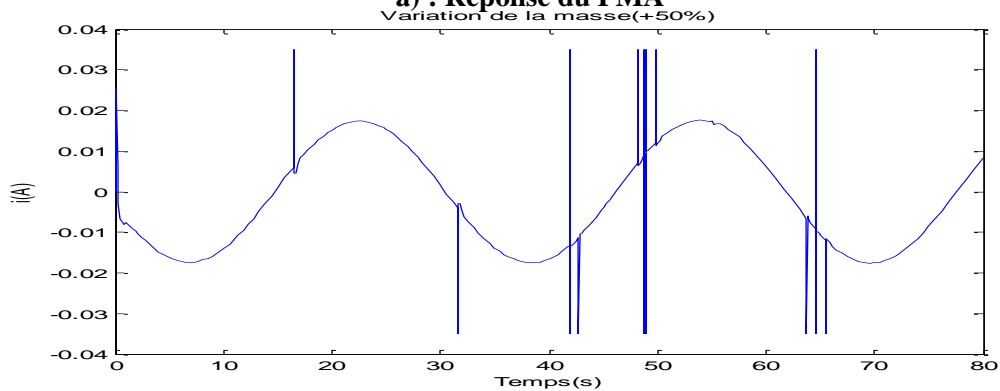


b) : Commande du PMA

Figure IV.23. 1a: réaction du régulateur par MG à diminution de la masse (-2 .125kg) à l'instant $t= 41s$

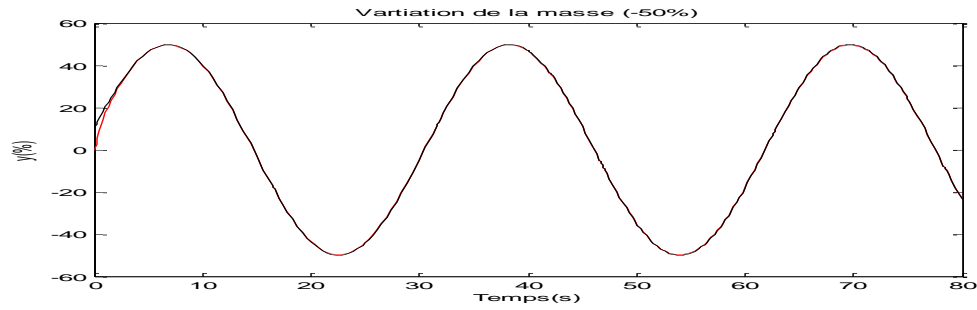


a) : Réponse du PMA

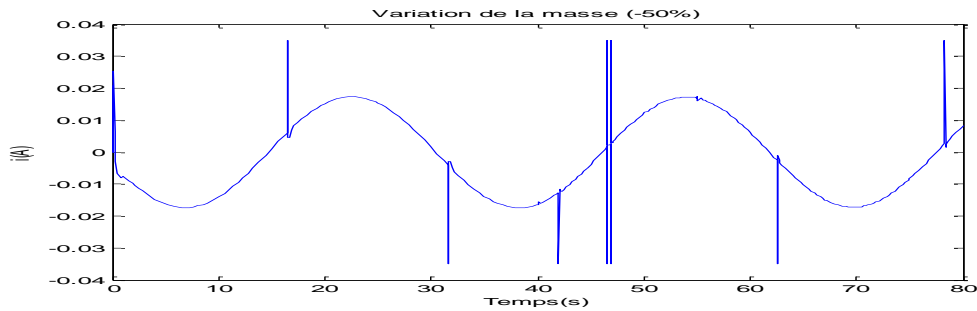


b) : Commande du PMA

Figure IV.24. 1a: réaction du régulateur par MG à l'augmentation de la masse (+4 .5kg) à l'instant $t= 41s$



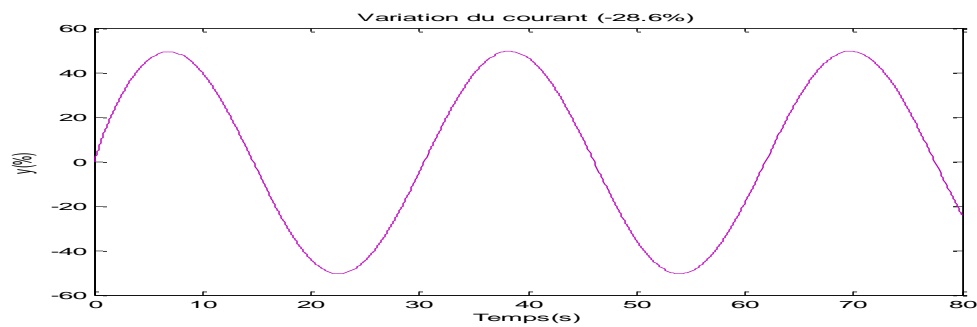
a) : Réponse du PMA



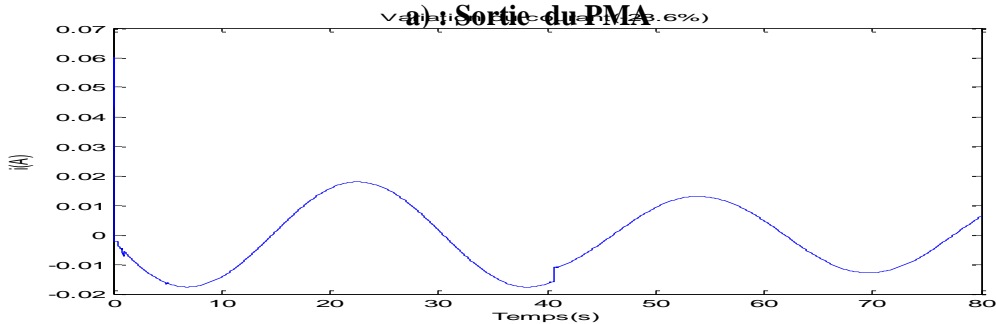
b) : Commande du PMA

Figure IV.25. 1a: réaction du régulateur par MG à diminution de la masse (-4.5kg) à l'instant $t = 41s$

La variation du courant de pré-magnétisation influe directement sur la commande du PMA. Ce qui est démontré par les résultats de simulation représentés par les figures (IV.26-29). On voit clairement que au moment de la variation paramétrique du courant de pré-magnétisation d'une augmentation de 10mA qui est une valeur limite de stabilité, la commande du PMA a enregistré un changement. Mais la sortie du PMA reste toujours stable.

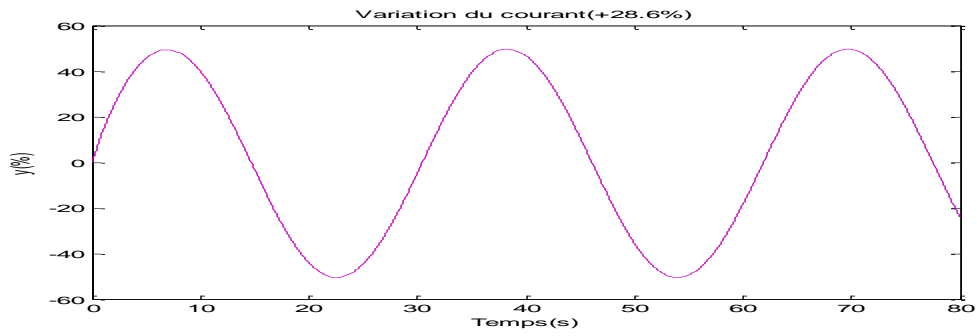


a) : Sortie du PMA

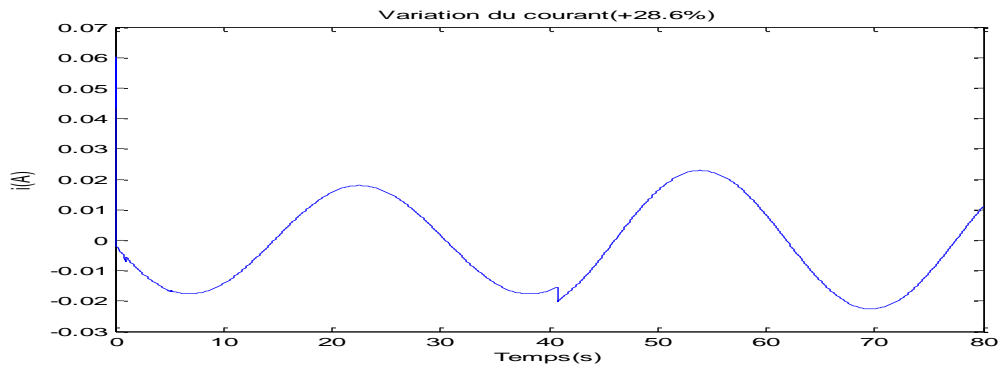


b) : Commande du PMA

Figure IV.26. 1a: réaction du régulateur flou à diminution du courant (-10mA) à l'instant $t = 40s$

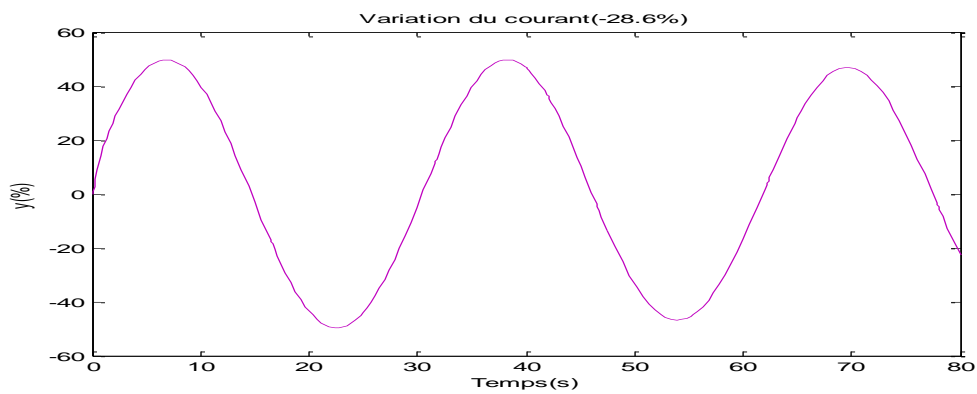


a) : Sortie du PMA

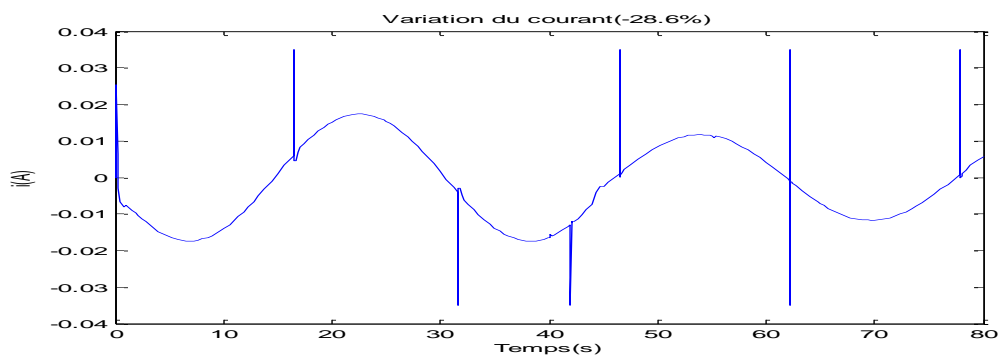


b) : Commande du PMA

Figure IV.27. 1a: réaction du régulateur flu à l'augmentation du courant (+10mA) à l'instant $t= 40s$

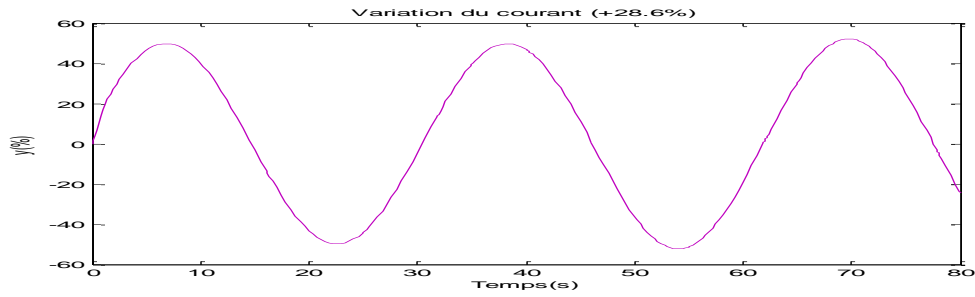


a) : Sortie du PMA

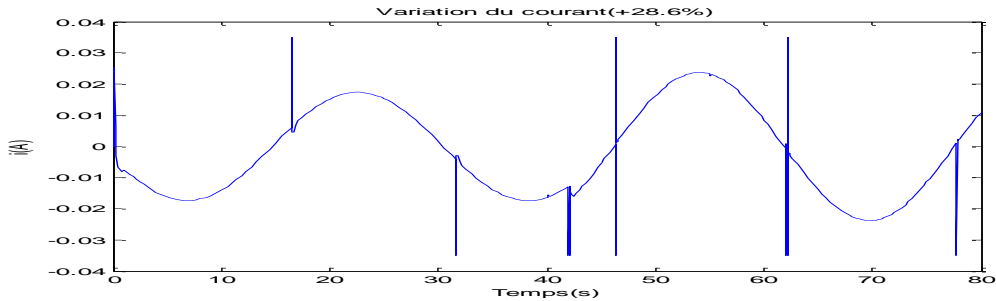


b): Commande du PMA

Figure IV.28. 1a: réaction du régulateur MG à diminution du courant (-10mA) à l'instant $t= 41s$



a) : Sortie du PMA



b) : Commande du PMA

Figure IV.29. 1a: réaction du régulateur MG à l'augmentation du courant (+10mA) à l'instant $t= 41s$

IV.8. Précision et énergie

Nous définissons deux critères, le premier est en fonction de la commande appliquée, on peut le considérer comme un critère énergétique, le deuxième est en fonction de l'erreur statique du déplacement.

Pour ce la, le temps de simulation est fixé à 80s et la consigne est à 50% de l'entrefer.

- Commande par la logique floue :

Les formes de la commande et de l'erreur statique sont données par les figures (IV. 30-31) :

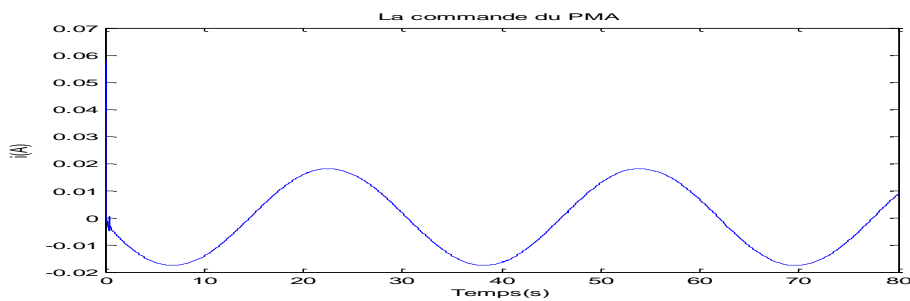


Figure IV. 30 : Commande du PMA généré par le régulateur flou.

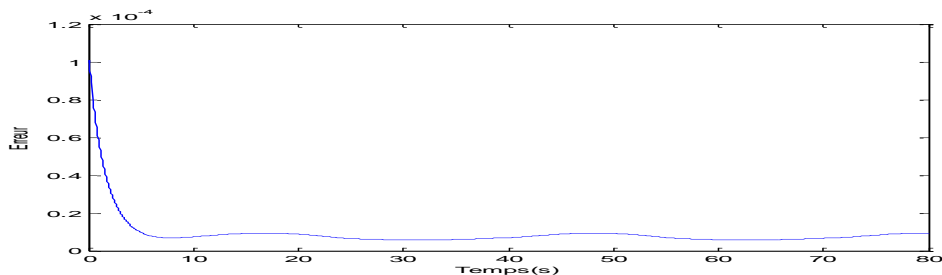


Figure IV. 31: Erreur statique pour le déplacement (cas d'un régulateur flou)

➤ *Commande par mode de glissement :*

Les formes de la commande et de l'erreur statique sont données par les figures (IV. 32-33) :

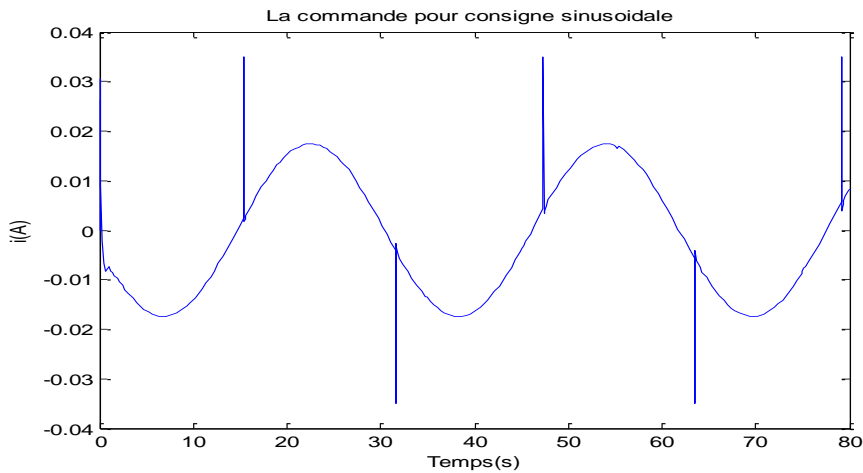


Figure IV. 32 : Commande du PMA générée par régulateur par mode de glissement

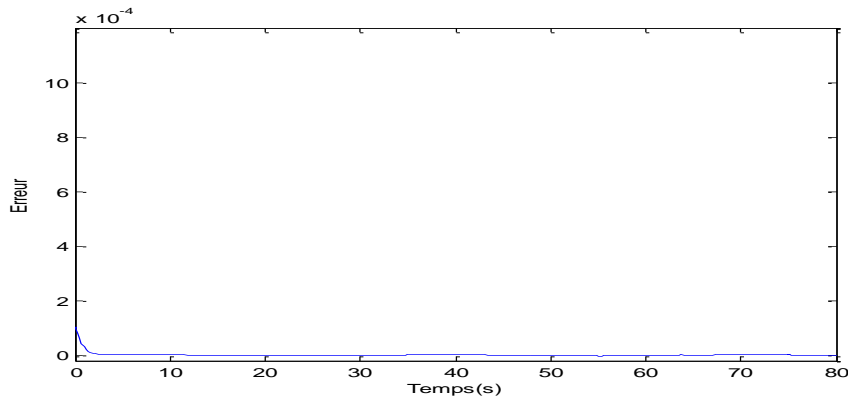


Figure IV. 33 : Erreur statique du déplacement (cas d'un régulateur par mode de glissement)

Les résultats numériques des simulations sont données par le critère énergétique J_1 et le critère de précision J_2 qui sont définis par :

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^P (u^T u) \quad (\text{IV-2})$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^P (e^T e) \quad (\text{IV-3})$$

Où u est la commande à l'entrée du système et e l'erreur statique.

Critère	Commandes développées pour le palier magnétique actif		
	Commande PID (30%)	Commande par mode glissement	Commande floue
$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^P (u^T u)$	12.2274	0.0199	0.1151
$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^P (e^T e)$	3.0074e-006	2.6845e-008	1.7883e-007

Tableau IV. 2 : Etude comparative entre les commandes développées pour le palier

Nous pouvons déduire que pour le mode de glissement, le système est bien modélisé et pour cela les deux critères (précision et énergie) prend les valeurs les plus petites. A partir de l'analyse précédente, nous pouvons dire que la commande floue et la commande par mode de glissement sont les plus performantes du point de vue minimisation des deux critères par rapport au régulateur PID classique.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons comparé les performances de deux commandes non linéaires appliquées au palier magnétique :

- La commande par la logique floue se prête très bien au réglage et à la commande de processus mal maîtrisable par des méthodes classiques conventionnelles. L'application de cette commande sur le palier magnétique a permis de donner de bons résultats, notamment en termes de poursuite de trajectoires et de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.
- La commande par mode de glissement donne également de bons résultats en termes de poursuite de trajectoires, de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et perturbations.
- La commande par mode de glissement est la meilleure commande pour le palier.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, concerne la commande classique et les commandes non linéaires du courant du palier magnétique actif.

Premièrement ; nous avons présenté le palier magnétique actif comme une très bonne alternative pour surmonter les insuffisances des paliers conventionnels. Nous avons montré également que les PMA sont des paliers instables. Sans une commande de régulation le PMA ne peut pas fonctionner, alors un asservissement est indispensable pour le fonctionnement de ce palier.

La chose la plus importante dans l'utilisation des PMA c'est qu'ils offrent l'opportunité de faire un équilibrage actif du rotor afin de diminuer au minimum les vibrations mécaniques, causes des détériorations des équipements et de leur dégradation prématurée, si on sait que la longévité des équipements mécaniques est tributaire du niveau de ces vibrations. Actuellement avec les PMA ces niveaux de vibrations sont généralement divisés par un facteur de 10.

On applique deux commandes non linéaires (la commande par la logique floue et la commande par les modes de glissement) au PMA :

- La commande par la logique floue se prête très bien au réglage et à la commande de processus mal maîtrisable par des méthodes classiques conventionnelles. L'application de cette commande sur le palier magnétique a permis de donner de bons résultats, notamment en termes de poursuite de trajectoires et de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.
- La commande par mode de glissement donne également de bons résultats en termes de poursuite de trajectoires, de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et perturbations.

Enfin, nous avons effectués une étude comparative entre ces commandes qui a révélé que la commande par les modes glissants est la plus performante

Bibliographie

Bibliographie

- [1] L.Reznik, "**Fuzzy controllers**", Newnes, Victoria University of Technology, Melbourne, Australia1997.
- [2] K.M.Passino and S.Yurkovich, "**Fuzzy control** ", Addison-Wesley, The Ohio state Univerty.1998.
- [3] John Y. Hung, Weibing Gao and James C. Hung, « **Variable Structure Control: A Survey**», IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol 40. No. 1, February 1993, pp.1-21.
- [4] Weibing Gao and James C. Hung "**Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach**", IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol 40. No. 1, February 1993, pp.45-52. .
- [5] Schweitzer G., "**Active Magnetic Bearings –Chances and limitations**", International Center of Magnetic Bearings, ETH Zurich, CH-8092 Zurich, 14P.
- [6] Brad Paden, Nancy Morse and Roy Smith, "**Magnetic Bearing Experiment for Integrated Teaching and Research Laboratories**", IEEE Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn September 1996, pp.421-425.
- [7] Jérôme Dalamare et Fabien Faure, "**Les paliers magnétiques**", Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.
- [8] B.Atoui, "**Commande Prédictive Non Linéaire : Application au Palier Magnétique Actif (PMA)** ", Mémoire de Magister, ENP (Alger) ,2006.
- [9] G. Schweitzer, "**Mechatronics- A Concept With Examples In Active Magnetic Bearings**", Mechatronics, vol. 2, No. 1, 1992, pp. 65-74, 1992.
- [10] Norman Grum & Brian Green "**Active Magnetic Bearing Requirements for Turbo machinery**", Dept. of Automatic Control and Systems Engineering, The University, Sheffield.
- [11] Shiyu Zhou and Jianjun Shi, "**Active Balancing and Vibration Control of Rotating Machinery: A Survey**", The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 4, July 2001, pp 361-371.
- [12] Helmut HABERMANN, "**Paliers Magnétiques**", Techniques de l'ingénieur, B5345, pp 20.
- [13] Jean-Christophe Ponsart, "**Asservissements Numériques de Paliers Magnétique Application aux Pompes à vide**", Thèse de doctorat Université de

-
- Savoie, 1996, 137p.
- [14] M.S. de Queiroz, D.M. Dawson, and A. Suri, "**Nonlinear Control of a Large Gap 2-DOF Magnetic Bearing System Based on a Coupled Force Model**", Proceedings of the American Control Conference, June 1997, pp 2165-2169.
- [15] Debin Li, Shuqin Liu, Wentao Yu and Jiasheng Guo, "**The Simulation of the Active Magnetic Bearing-Rotor system Based on nonlinear Model**", IEEE Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 2004 Hang Zhou, P.R. China, pp.3339-3343 .
- [16] Marjan Golob and Boris Tovornik, "**Modelling and control of the magnetic suspension system**", ISA Transactions Vol.42, 2003, pp. 89-100.
- [17] Abdul Rachid Husain, Mohamad Noh and Abdul Halim Mohd. Yatim, "**Application of H₂- based Sliding Mode Control for an Active Magnetic Bearing System**" Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology , Vol.27, February 2008, pp.40-47.
- [18] Abdul Rashid Husain, Mohamad Noh Ahmad, and Abdul Halim Mohd. Yatim, "**Asymptotic Stabilization of an Active Magnetic Bearing System Using LMI-based Sliding Mode Control**", Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 27, February 2008, pp.48-55.
- [19] Norbet Steinschaden and Helmut Springer, "**Some Nonlinear Effects of Magnetic Bearings**", Proceeding of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, September, 1999, Las Vegas, Nevada, USA. pp.9.
- [20] F.Chevrie and F.Guely, "**La logique floue** ", Cahier Technique N°191. Groupe Scheider, Mars 1998, pp .9-28.
- [21] S.Labiod, "**Contribution à la commande adaptative Floue des systèmes Non Linéaires** « Thèse de doctorat, ENP (Alger), 2005.
- [22] M.Fodil, "**Commande adaptative par logique flou de la machine asynchrone** "Mémoire de Magister, Université de M'sila 2008.
- [23] A. K. Shaout and J. T. McDonough III , "**Fuzzy System Identification Using Rule-Based Models**", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 93, 1993, pp.510-513.
- [24] S. Daley and D. A. Newton, "**Intelligent Control of An Electro-Hydraulic Rotary Drive System**", IEE Conference Publication No. 389, March 1994, pp.699-704.

-
- [25] Sung-Kyung Hong and Reza Langari, “ **Robust Fuzzy Control of a Magnetic Bearing Subject to Harmonic Disturbances**”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 2, March 2000,pp.366-371.
- [26] Shin-Shiung Yu, Shing-Jen Wu and Tsu-Tian Lee ” **Optimal Fuzzy Control of Radial Active Magnetic Bearing Systems**”, Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation July, 2003, Kobe, Japan,pp.1393-1398.
- [27] Shuliang Lei, Alan Palazzolo and Uhnjoo Na, “**Non-Linear Fuzzy Logic Control for Forced Large Motions of Spinning Shafts**”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 235, N: 3, 2000, pp. 435-449.
- [28] Maki K. Habib and Jawaid I. Inayat-Hussain, “**Control of Dual Acting Magnetic Bearing Actuator System Using Fuzzy Logic**”, Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation July , 2003, Kobe, Japan,pp.97-101.
- [29] José Andrés Santisteban¹, Daniel S. Sacramento¹, “**A Fuzzy Controlled Electromagnetic Axial Bearing**”, ABCM Symposium Series in Mechatronics-Vol. 1, 2004, pp.341-345.
- [30] Zhang Danhong, Tang Ling, Su Yixin and Hu Yefa, “ **Magnetic Bearings Control Using Fuzzy Logic and a Single Neuron**”, ”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 6, 2006.
- [31] S. F. Rezek, T. Awad, A. Saafan and A. Y. Elmahdy, “**Fuzzy Logic Control of Active Magnetic Bearing**”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Taipei, Taiwan, September, 2004, pp.183-188.
- [32] John Y. Hung, “**Magnetic Bearing Control Using Fuzzy Logic**”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, November/December 1995,pp.1492-1497.
- [33] Selim Sivrioglu and Kenzo Nonami,”**Sliding Mode Control With Time – Varying Hyperplane for AMB Systems**”, IEEE Transactions on Mechatronics, Vol.3, NO.1, March 1998, pp.51-59.
- [34] Hunsruedi Bühler, "**Réglage par mode de glissement**", Press polytechniques romandes Lausanne, 1986.
- [35] J .J.E Slotine and W .Li ,”**Applied Nonlinear Control**”, Prence Hall Englewood cliffs, New Jersey, 1991.

-
- [36] Chung-Chun Kung and Chia-Chang Liao, **“Fuzzy-Sliding Mode Controller Desing For Tracking Control Of Non-Linear System”**, Proceedings of the American Control Conference Baltimore, Maryiand June 1994, pp.180-184.
- [37] R.Ouigini, R.Bouzid and Y.Sellami, **”Une commande robuste par mode glissant flou Appliquée à la poursuite de trajectoire d’un robot mobile non holonome ‘CISTEMA’2003**, pp.1-7.
- [38] Russell D. Smith and William F. Weldon, **"Nonlinear Control of a Rigid Rotor Magnetic bearing system: Modeling and simulation with full state feedback"**, IEEE Transactions on magnetic, vol.31, N°.2, March ,1995, PP.973-980.
- [39] M. Boubakir Ahcene, **”Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés**. ‘Mémoire de magister, EMP (Alger), 2007.
- [40] Ann E. Rundell, Sergey V. Drakunov and Raymond A. DeCarlo, **"A Sliding Mode Observer and Controller for Stabilization of Rotational Motion of a Vertical Shaft Magnetic Bearing"**, IEEE Transactions on Control Systems Technology , Vol. 4, NO. 5, September 1996, pp.598-608.
- [41] E. Rundell, S. Drakunov and R.A. DeCarlo, **“Rotational Motion Stabilization for a Vertical Shaft Magnetic Bearing with a Sliding Mode Controller and Observer”**, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications Dearborn, September ,1996,pp.662-667.
- [42] Ting-Jen Yen and Ying-Jer Chung, **“Sliding Control of Magnetic Bearing Systems”**, Proceedings of the American Control Conference Chicago, Illinois, June 2000, pp.1622-1626.
- [43] T. P. Mininhan, S. Lei, G. Sun, A. Palazzolo, A. F. Kascak and T. Calvert ,**"Large motion tracking control for thrust magnetic bearings with fuzzy logic, sliding mode ,and direct linearization"**, Journal of Sound and Vibration, Vol.263 ,2003, pp. 549 – 567.
- [44] J.M.A. Scherpen, B. van der Kerk , J. B. Klaassens, M. Lazeroms and S. Y. Kan, **"Nonlinear Control for Magnetic Bearings in Deployment Test Rigs: Simulation and Experimental Results"**, In Proc. CDC’ 98, Tampa, FI, USA, pp. 2613 – 2618.

-
- [45] A. E. Hartavi, O.USturn, R.N.Tuncay and F.Gurleyen,"**The Design, Simulation and Experimental Study of Active Magnetic Bearing**", IEEE Transactions on Control Systems Technology, **2001**, pp.492-495.
- [46] Denis Fermental, Peter LaRocca and Edward Cusson, "**A Decomposition of the Jeffcott Rotor**", The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.555 Technology Square, Cambridge, MA.02139, pp.187-192.

ملخص

هذه المذكرة تعنى بالنمذجة و التحكم غير الخطي للأنظمة ذات المحمل المغناطيسي الفعال . في القسم الأول أظهرنا المفاهيم الأساسية طريقة اشتغال هذا المحمل . القسم الثاني يختص بتحليل قواعد التحكم المطبقة على المحمل اذ انصب اهتمامنا على التحكم الغامض و التحكم الانزلاقي. وفي الأخير قمنا بدراسة مقارنة باستعمال المحاكاة لنرى مدى فعالية كل طريقة.

كلمات مفتاحية : المحمل المغناطيسي الفعال, الرفع المغناطيسي , المنطق الغامض , النمط الانزلاقي .

Résumé :

Ce mémoire concerne la modélisation et la commande non linéaire du palier magnétique actif. En premier lieu, nous avons présenté les notions fondamentales et le principe de fonctionnement de ce palier. La deuxième partie, concerne la synthèse des lois de commandes appliqués au palier magnétique à savoir : la commande par la logique floue et la commande par mode de glissement. En dernier lieu, on établit une étude comparative moyennant la simulation pour avoir l'efficacité de chaque commande. .

Mots clés : Palier Magnétique Actif, Lévitacion magnétique, Logique floue, Mode de glissement.

Abstract :

This memory concerns with the modelling and the nonlinear control of the active magnetic bearing. Initially, we presented the basic concepts and the principle of operation of this bearing. The second part relates to the synthesis of the control laws applied to bearing: the fuzzy logic control and the sliding mode control. Finally, we make a comparative study to see the efficiency of each control.

Key words: Active Magnetic Bearing, Magnetic Levitation, Fuzzy logic, sliding mode.