

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'Automatique

Mémoire de Master

Commande d'un système à lévitation magnétique

Sifeddine BENAHMED

Sous la direction de :

MR. L. ABDELOUEL Chargé de cours *ENP*

Présenté et soutenu publiquement le 22/06/2016

Composition du jury :

Président : MR. R. ILLOUL Maître de conférence *ENP*

Rapporteur : MR. L. ABDELOUEL Chargé de cours *ENP*

Examineur : MR. ELM. BERKOUK Professeur *ENP*

Promotion 2016

Remerciement

Tout d'abord, je remercie الله ,le tout puissant de nous avoir accordé le savoir, le droit chemin, l'opportunité de poursuivre nos études et la force pour réaliser ce travail.

Je remercie mes parents, qui nous ont soutenus tout au long de nos étude.

Je remercie les plus vifs s'adressent particulièrement à mes promoteurs, Monsieur L.ABDELOUEL et Monsieur M.TADJINE.

Je remercie aussi, les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Mon sincère remerciement et Ma profonde gratitude vont également à toute l'équipe de l'Ecole Nationale Polytechnique pour les connaissances et le savoir faire qu'ils m'ont transmis pendant les cinq années de notre formation.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chères parents pour l'effort fournie et les immenses sacrifices consentis pour mon éducation et mon succès. Que الله vous protège et vous garde pour moi et pour la famille.

À ma soeur Ithem, Pour toutes les peines et tous les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation, sans toi je ne serais pas où j'en suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également:

À mes adorables sœurs,

À mon chère frère, Abdelmounaim

À mes amis et frères Sheikh Mohamed, Mehdi, Bassem, Tayeb, Lotfi, Abderrahmane...

À Soulimane le frère que ne m'a pas donné ma mère,

À tous mes camarades automaticiens et polytechniciens,

À tous mes enseignants du primaire à l'université pour leur contribution à mon éducation.

Sifeddine,

ملخص

في هذا العمل سنتطرق إلى كيفية القيام بعملية التحكم لنظام الحمل المغناطيسي. في البداية سنعرف بالجهاز المذكور مع ذكر الإمكانيات العديدة المتاحة عند بنائه. سنقوم بعدها بإعطاء النموذج الرياضي اللاخطي لهذا النظام و الذي سيستغل لاحقا لتركيب قوانين تحكم لاخطية.
كلمات مفاتيح: حمل مغناطيسي، باكستيبين التاقلمي

Abstract

In this work, we are going to build and control a magnetic levitation system. First we will describe the system and explain how it working. A nonlinear mathematical model will be given and will be used to synthesize two non-linear controllers (Backstepping and adaptive). Both synthesized control laws will be implemented and simulated on Matlab/Simulink, with a comparison between the two approaches.

Key words : Maglev, Nonlinear control, Backstepping Control, Adaptive Backstepping control, Matlab/Simulink.

Résumé

Dans le présent travaille, nous allons entamer la commande d'un système à lévitation magnétique, on va d'abord présenter ce système et expliquer son principe de fonctionnement. Un modèle mathématique non linéaire sera donné et sera utilisé pour la synthèse deux correcteur non linéaire (Backstepping et Adaptative). Les deux lois de commandes synthétisées seront implémentées et simulées sur Matlab/Simulink, avec une comparaison entre les deux approches.

Mots clés : Lévitation magnétique, Commande non linéaire, Backstepping, Backstepping adaptative, Matlab/Simulink.

Table des matières

Remerciement

Table des matières

Table des figures

Introduction générale	8
1 Généralités	9
1.1 Introduction	9
1.2 La suspension magnétique	9
1.3 Composition du système à lévitation magnétique	10
1.4 Principe de fonctionnement	10
1.5 Modélisation du système à lévitation magnétique	11
1.5.1 Modélisation de la partie électromagnétique	11
1.5.2 Modélisation de la partie mécanique	12
1.5.3 Le modèle non linéaire	13
1.5.4 La représentation d'état du système	13
1.6 Conclusion	14
2 La commande du système	15
2.1 Introduction	15
2.2 Backstepping	15
2.2.1 Approche Backstepping	15
2.2.2 Vue d'ensemble sur le design du correcteur	17
2.2.3 Synthèse de la commande par Backstepping	18
2.3 Commande adaptative	18
2.3.1 Position du problème	19
2.3.2 Les différents types de la commande adaptative	19
2.3.2.1 Commande adaptative indirecte	19
2.3.2.2 Commande adaptative directe	20

2.3.2.3	Étapes de la commande adaptative indirecte	20
2.4	Backstepping Adaptative	20
2.4.1	Étape 1	21
2.4.2	Étape 2	21
2.4.3	Étape 3	21
2.4.4	Étape 4	22
2.5	Conclusion	22
3	Implémentation et résultats	23
3.1	Introduction	23
3.2	Les paramètres du système	23
3.3	Backstepping	23
3.3.1	Commentaire	24
3.3.2	Résultats de simulation	24
3.4	Backstepping Adaptative	25
3.4.1	Commentaire	26
3.4.2	Résultats de simulation	26
3.5	Etude comparative	27
3.5.1	commentaire	27
3.5.2	Résultats de simulation	28
3.6	conclusion	28
	Bibliographie	30

Table des figures

1.1	La suspension magnétique.	10
1.2	Le système à lévitation magnétique.	11
1.3	Principe de fonctionnement du système à lévitation magnétique.	11
1.4	Les forces agissent sur la boule.	12
2.1	Schéma de La commande adaptative indirecte.	19
2.2	Schéma de La commande adaptative directe.	20
3.1	Le modèle simulink.	24
3.2	La position de la balle.	25
3.3	La vitesse de la balle.	25
3.4	L'intensité du courant.	25
3.5	tous les états.	25
3.6	Backstepping avec une perturbation.	25
3.7	Le modèle Simulink.	26
3.8	La position de la balle.	27
3.9	La vitesse de la balle.	27
3.10	L'intensité du courant.	27
3.11	Tous les états.	27
3.12	Paramètre identifiés.	27
3.13	Backstepping et erreur de modélisation.	28
3.14	Backstepping adaptative une erreur de modélisation.	28

Introduction générale

les systèmes à lévitation magnétique ont une importance pratique dans de nombreux systèmes d'ingénierie tels que dans les trains à grande vitesse, paliers lisses, sustentation des modèles de soufflerie, isolation des vibrations des machines sensibles, la lévitation du métal en fusion dans des fours à induction, et la lévitation de plaques métalliques pendant la fabrication. Les systèmes de lévitation magnétique peuvent être classés comme des systèmes attractifs ou répulsifs tous dépendent de la source de la force de lévitation.

Problématique

Les systèmes à lévitation magnétique sont généralement instables en boucle ouverte et sont décrits par des équations différentielles fortement non linéaires qui présentent des difficultés supplémentaires pour le contrôle de ces systèmes. Par conséquent, il est très important de développer des commandes de haute performance pour régler la position de l'objet en lévitation.

Organisation du mémoire

Ce mémoire s'étend sur quatre chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale. Dans le premier chapitre, on s'intéressera la présentation du système à lévitation magnétique, son principe de fonctionnement ainsi que son modèle mathématique. Le second chapitre expose deux approches de commande proposées pour la résolution du problème de la stabilité de la balle en suspension.

Le dernier chapitre présente les résultats de l'implantation sous Matlab/Simulink de deux commandes qui ont été synthétisées.

Enfin, en conclusion, on donnera une synthèse du travail effectué et on résumera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Levitation magnétique, Maglev¹ ou suspension magnétique est une méthode par laquelle un objet est suspendu sans support autre que des champs magnétiques. La force magnétique est utilisée pour compenser les effets de l'accélération de la pesanteur et de toutes autres accélérations.

Les deux principales questions en cause en lévitation magnétique sont les forces de levage : fournir une force ascendante suffisante pour compenser la gravité tout en assurant la stabilité du système. Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de la suspension magnétique, les composants du système et son modèle non linéaire établi.

1.2 La suspension magnétique

Les matériaux et les systèmes magnétiques sont capables d'attirer ou de presser les uns des autres séparément ou ensemble avec une force dépendant du champ magnétique et la surface des aimants, l'exemple le plus simple de la suspension serait un dipôle simple, positionné dans le champ magnétique d'un autre dipôle orienté avec des pôles analogues se faisant face, de telle sorte que la force entre les aimants repousse les deux aimants.

Essentiellement, tous les types d'aimants ont été utilisés pour générer de la suspension pour la lévitation magnétique ; aimants, électroaimants, ferromagnétisme, diamagnétisme et aimants supraconducteurs permanents.

Il existe deux concepts fondamentaux concernant la physique et les propriétés de lévitation de la matière :

- le concept électromagnétique (EML) : la lévitation est générée par des électroaimants régulés (voir figure 1.1). Le Transrapid (allemand) et le Swissmetro sont des trains

¹Magnetic Levitation System

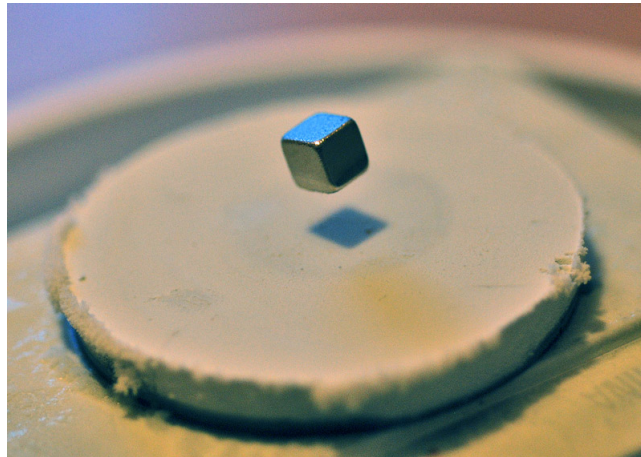


Figure 1.1: La suspension magnétique.

basés sur le concept EML;

- le concept électrodynamique (EDL) : la lévitation est basée sur les forces de répulsion générées par les courants induits (dits courants de Foucault) qui n'apparaissent que lors d'un déplacement relatif des corps en présence. Il est donc nécessaire de propulser initialement le train avant qu'il puisse léviter magnétiquement. Le seul projet actuellement très avancé utilisant ce concept de sustentation est le Maglev japonais.

1.3 Composition du système à lévitation magnétique

Le système à lévitation magnétique est composé de (figure 1.2):

- **Electroaimant:** C'est une simple bobine enroulée sur un noyau de fer (un boulon d'acier par exemple).
- **Le corps à lévité:** Le corps à lévité est soit une boule métallique ou bien une boule magnétique.
- **Capteur de position:** plusieurs capteurs sont utilisés, comme le capteur à effet Hall, le capteur optique (source lumineuse plus diode photoconductrice) et le capteur ultrason.

1.4 Principe de fonctionnement

Le processus consiste contrôler la position verticale de la balle, en ajustant le courant dans le électro-aimant par l'intermédiaire d'une tension d'entrée. La position de la balle est lue par un transducteur optique qui peut discriminer les mouvements verticaux de la balle des

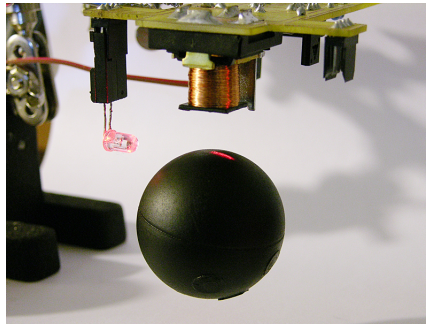


Figure 1.2: Le système à lévitation magnétique.

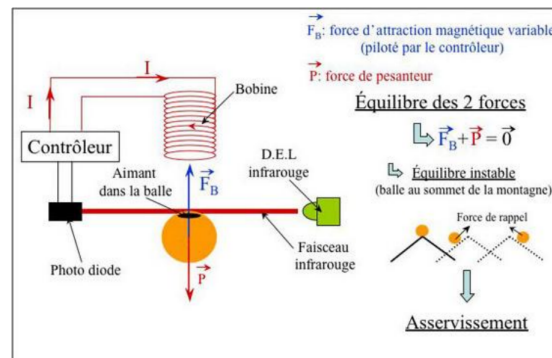


Figure 1.3: Principe de fonctionnement du système à lévitation magnétique.

horizontales.

La balle, dans les conditions normales, est soumise à une unique force qui est son propre poids P . Cette force a pour effet d'attirer la balle vers le sol (voir figure 1.3). Pour compenser cette force, on utilise le champ magnétique créé par la bobine. Cette force F_B va agir dans le sens inverse du poids et attirer la balle vers la bobine.

1.5 Modélisation du système à lévitation magnétique

la dynamique du système à lévitation magnétique peut être modélisée, par l'étude du système électromagnétique et du système mécanique [3].

1.5.1 Modélisation de la partie électromagnétique

La force électromagnétique produite par le courant est donnée par la loi de *Kirchoff* suivante:

$$u(t) = V_R + V_L = Ri(t) + \frac{dL(x)i(t)}{dt} \quad (1.1)$$

avec :

- $u(t)$: la tension appliquée,

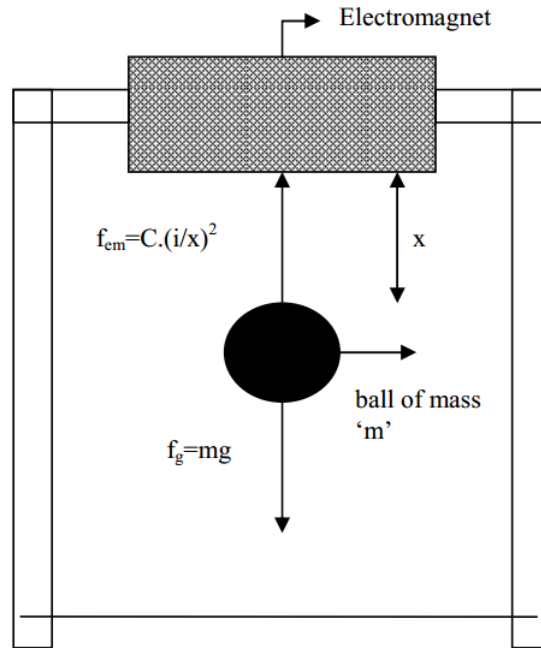


Figure 1.4: Les forces agissent sur la boule.

- $i(t)$: le courant dans la bobine électromagnétique,
- R : la résistance de la bobine,
- L : l'inductance de la bobine.

1.5.2 Modélisation de la partie mécanique

Le schéma de la ball ferromagnétique suspendu par l'équilibre entre la force électromagnétique $f_{em}(x, i)$ et la force gravitationnelle f_g est représenté dans la figure 1.4.

La force résultante appliquée sur la ball, est donnée par la 3^{eme} lois de *Newton*, en négligeant la force du frottement et la résistance de l'air:

$$f_{res} = f_g - f_m \quad (1.2)$$

$$m\ddot{x} = mg - c\left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (1.3)$$

1.5.3 Le modèle non linéaire

$$\begin{cases} V = \frac{dx}{dt} \\ u = Ri + \frac{dL(x)}{dt} \\ m\ddot{x} = mg - C\left(\frac{i}{x}\right)^2 \\ L(x) = L + \frac{L_o x_o}{x} \end{cases} \quad (1.4)$$

On remarque que $L(x)$ est une fonction non linéaire de la position de la ball. différentes approximations ont été utilisées pour déterminer l'inductance du système, dans ce mémoire, on va utiliser l'approximation suivante [3]:

$$L(x) = L + \frac{L_o x_o}{x} \quad (1.5)$$

1.5.4 La représentation d'état du système

Prenons $x_1 = x$, $x_2 = v$, $x_3 = i$ donc la représentation d'état du système est la suivante [3]:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ g - \frac{C}{m}\left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ -\frac{R}{L}x_3 + 2\frac{C}{L}\left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2}\right) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} U \\ Y = [1 \ 0 \ 0] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1.6)$$

Afin de simplifier le modèle et la synthèse de la commande, nous ferons le changement de variable suivant:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{-C}{m}, \\ a_2 = \frac{-R}{L}, \\ a_3 = \frac{2 \cdot C}{L}, \\ a_4 = \frac{1}{L} \end{cases} \quad (1.7)$$

Alors le système devient:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g + a_1 \cdot \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ \dot{x}_3 = a_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1^2} + a_4 \cdot U \end{cases} \quad (1.8)$$

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le système à lévitation magnétique, ses composants ainsi que son principe de fonctionnement.

Nous avons établi la modélisation de ce système sur la base de l'équation du mouvement de l'objet et les caractéristiques électriques et magnétiques de l'électro-aimant. Ce modèle nous a bien montré que le système présente de fortes non-linéarités, ce qui montre la difficulté de la synthèse de la commande pour ce type de système, qui va faire l'objet du chapitre 2.

Chapitre 2

La commande du système

2.1 Introduction

Après l'obtention du modèle mathématique qui décrit le comportement du système, ce chapitre sera consacré à la synthèse de correcteurs non linéaires.

Nous allons commencer par la synthèse d'une commande non linéaire en utilisant l'approche *Backstepping*, ainsi que la commande *Backstepping Adaptive* qui présente certains avantages par rapport à la première commande.

2.2 Backstepping

Dans la théorie du contrôle, Backstepping est une technique développée en 1990 par *Petar V. Kokotovic* pour la conception des correcteurs qui assurent la stabilité pour une classe spéciale de systèmes dynamiques non linéaires. Ces systèmes sont construits à partir de sous-systèmes qui sont composés à partir d'un sous-système irréductible qui peut être stabilisé à l'aide d'une autre méthode. En raison de cette structure récursive, la synthèse du correcteur peut être commencée au niveau du système qui est connu et stable et "marche arrière" jusqu'à ce qu'on construit d'autres contrôleur qui stabilisent progressivement chaque sous-système externe. Le processus se termine lorsque le contrôle externe final est atteint. Par conséquent, ce processus est connu sous le nom de *Backstepping* [1].

2.2.1 Approche Backstepping

L'approche Backstepping fournit une méthode récursive pour stabiliser l'origine d'un système sous forme stricte de rétroaction pour les systèmes de la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}} = f_x(\mathbf{x}) + g_x(\mathbf{x})z_1 \\ \dot{z}_1 = f_1(\mathbf{x}, z_1) + g_1(\mathbf{x}, z_1)z_2 \\ \dot{z}_2 = f_2(\mathbf{x}, z_1, z_2) + g_2(\mathbf{x}, z_1, z_2)z_3 \\ \vdots \\ \dot{z}_i = f_i(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i) + g_i(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i)z_{i+1} \quad \text{for } 1 \leq i < k-1 \\ \vdots \\ \dot{z}_{k-1} = f_{k-1}(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) + g_{k-1}(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{k-1})z_k \\ \dot{z}_k = f_k(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k) + g_k(\mathbf{x}, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k)u \end{array} \right.$$

avec :

- $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ avec $n \geq 1$
- $z_1, z_2, \dots, z_i, z_{k-1}, z_k$ sont des scalaires,
- u l'entrée (scalaire) du système,
- $f_1, f_2, \dots, f_i, f_{k-1}, f_k$ s'annulent à l'origine,
- $g_1, g_2, \dots, g_i, g_{k-1}, g_k$ sont non nulles dans le domaine $(g_i(x, z_1, \dots, z_k) \neq 0 \text{ pour } 1 \leq i \leq k)$.

On considère aussi que le sous système:

$$\dot{x} = f_x(x) + g_x(x)u_z(x) \quad (2.1)$$

est stabilisé à l'origine par une commande connue $u_x(x)$ avec $u_x(0) = 0$. On considère aussi que la fonction de *Lyapunov* V_x pour ce sous-système est connue. Alors celui-ci est stabilisé par une autre méthode, et l'approche *Backstepping* étends sa stabilité vers les sous-systèmes externes.

Dans les systèmes de cette forme stricte de rétroaction autour d'un sous-système stable:

- L'entrée de commande *Backstepping* conçu a son effet stabilisateur immédiatement sur l'état z_n .
- L'état agit alors comme un correcteur sur l'état z_{n-1}
- Ce processus se poursuit de telle sorte que chaque état z_i est stabilisée par la commande fictive z_{i+1} .

2.2.2 Vue d'ensemble sur le design du correcteur

On considère que le plus petit (à savoir, d'ordre inférieur) sous-système:

$$\dot{x} = f_x(x) + g_x(x)u_x(x) \quad (2.2)$$

est déjà stabilisé à l'origine par certains commande u_x avec $u_x(0) = 0$. Autrement dit, le choix de u_x pour stabiliser ce système doit se produire en utilisant une autre méthode. Il est également supposé qu'une fonction de *Lyapunov* V_x pour ce sous-système stable est connue. *Backstepping* fournit un moyen d'étendre la stabilité de ce sous-système à l'ensemble du système.

Une commande $u_1(x, z_1)$ est synthétisée de tel sorte que le système $\dot{z}_1 = f_1(x, z_1) + g(x, z_1)u_1(x, z_1)$ est stabilisé. Le synthèse du contrôleur se fait sur la base de la fonction de *Lyapunov* augmentée $V_1(x, z_1) = V_x(x) + \frac{1}{2}(z_1 - u - x(x)^2)$.

La commande $u_2(x, z_1, z_2)$ est synthétisée de façon que le système:

$$\dot{z}_2 = f_2(x, z_1, z_2) + g_2(x, z_1, z_2)u_2(x, z_1, z_2) \quad (2.3)$$

est stabilisé. La commande est synthétisée à partir de la fonction de *Lyapunov* augmentée $V_2(x, z_1, z_2) = V_1(x, z_1) + \frac{1}{2}(z_2 - u_1(x, z_1))^2$. Le processus continu jusqu'à ce que la commande actuelle u est connue, et:

- La commande réelle u stabilise z_k vers la commande fictive u_{k-1} .
- La commande fictive u_{k-1} stabilise z_{k-1} vers la commande fictive u_{k-2} .
- La commande fictive u_{k-2} stabilise z_{k-2} vers la commande fictive u_{k-3} .
- ...
- La commande fictive u_2 stabilise z_2 vers la commande fictive u_1 .
- La commande fictive u_1 stabilise z_1 vers la commande fictive u_x .
- La commande fictive u_x stabilise x vers l'origine.

2.2.3 Synthèse de la commande par Backstepping

Afin de simplifier la synthèse nous ferons le changement de variables suivant:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1r} \\ z_2 = x_2 \\ z_3 = g + a_1 \cdot \left(\frac{x_1}{x_3}\right)^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Donc le modèle d'état du système devient :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = f_x + g_x \cdot U \end{cases} \quad (2.5)$$

avec :

$$\begin{cases} f_x = a_1 \cdot \left(\frac{a_3}{x_1} - 1\right) \cdot \frac{x_2 \cdot x_3^2}{x_1^3} + a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{x_3^2}{x_1^2} \\ g_x = 2 \cdot a_1 \cdot a_4 \cdot \frac{x_3}{x_1^2} \end{cases} \quad (2.6)$$

En utilisant la méthodologie du *Backstepping* la loi de commande s'écrit:

$$\left\{ U = \frac{1}{g_x} \cdot \left(-f_x - \lambda_1 \cdot z_1 - \lambda_2 \cdot z_2 - \lambda_3 \cdot z_3 - g - a_1 \cdot \left(\frac{x_{3r}}{x_{1r}}\right)^2 \right) \right. \quad (2.7)$$

2.3 Commande adaptative

La commande adaptative est le procédé de commande utilisé par un correcteur qui doit s'adapter à un système de régulation avec des paramètres qui varient ou sont initialement incertain. Par exemple, quand un avion vole, sa masse diminuera lentement en raison de la consommation de carburant ; une loi de contrôle qui s'adapte à ces conditions est nécessaire. La commande adaptative est réalisée en combinant [5]:

- L'estimation en ligne des paramètres du système.
- Une loi de commande qui recalcule la valeur de la commande à partir des paramètres estimés.

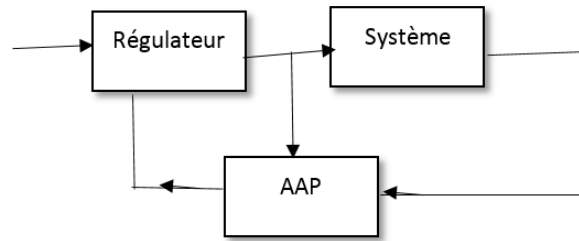


Figure 2.1: Schéma de La commande adaptative indirecte.

2.3.1 Position du problème

On considère le système non linéaire suivant:

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, u, \theta) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.8)$$

θ est le vecteur de paramètre du système (par exemple: l'inductance, la masse, etc.). Pour commander le système, on a besoin de connaître exactement le vecteur de paramètre θ . Ceci doit être fait avant l'implémentation de la loi de commande (identification des paramètres). La loi de commande développée réalise les objectifs tant que les paramètres sont connus d'une façon exacte. Malheureusement lors de fonctionnement du système de commande, les paramètres peuvent être variés en fonction du temps. En effet, une résistance augmente sous l'effet du température et la température augmente avec le temps de fonctionnement. De même, une inductance diminue sous l'effet du saturation.

La commande devient alors inefficace devant ces variations et on doit réactualiser la commande (adapter la commande) pour les nouvelles valeurs du vecteurs de paramètres (θ). La commande adaptative appartient à la classe des commandes à base d'observateur, l'observateur étant chargé d'estimer le vecteur des paramètres (AAP ¹).

2.3.2 Les différents types de la commande adaptative

Il existe deux classes importantes de la commande adaptative:

2.3.2.1 Commande adaptative indirecte

Dans ce cas la l'algorithme d'adaptation paramétrique est chargé d'estimer les paramètres (θ) du système. Cet estimation est alors utilisée pour actualiser (adapter) les paramètres du régulateur (θ) (Fig 2.1).

¹Algorithme d'Adaptation Paramétrique

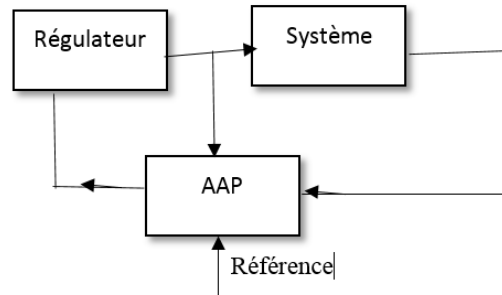


Figure 2.2: Schéma de La commande adaptative directe.

2.3.2.2 Commande adaptative directe

Dans la commande adaptative directe, l'algorithme d'adaptation paramétrique estime directement les paramètres ($\hat{\theta}_r$) du régulateur sans passer par l'estimation des paramètres (θ_s). En effet, l'objectif est de maintenir les performances et non pas de connaître les paramètres du système. Donc, on essaye d'estimer directement les paramètres du régulateur qui nous garantissent le maintien des performances. En général, l'espace d'estimation du régulateur est réduit par rapport à l'espace d'estimation des paramètres du système. Cependant, la complexité est augmentée (Fig 2.2) [5].

2.3.2.3 Etapes de la commande adaptative indirecte

- Développement d'une commande $u(x, \theta_s)$ en supposant que les paramètres sont connus.
- Développement d'un algorithme d'adaptation paramétrique permettant d'estimer $\hat{\theta}_s(t)$.
- Remplacer θ_s par $\hat{\theta}_s$ en appliquant le principe d'équivalence certain "Séparation". Ce dernier n'est pas applicable que pour les système linéaire c-à-d pour pouvoir appliquer ce principe, il faut que l'estimation soit sur des paramètres linéaires.

2.4 Backstepping Adaptative

La commande utilisée est la commande Adaptative indirecte. Pour synthétiser la commande on va passer les étapes suivante:

2.4.1 Etape 1

On synthétise la commande comme si on connaît les paramètres du système, donc la commande s'écrit:

$$\left\{ U = \frac{1}{g_x} \cdot (-f_x - \lambda_1 \cdot z_1 - \lambda_2 \cdot z_2 - \lambda_3 \cdot z_3 - g - a_1 \cdot \left(\frac{x_{3r}}{x_{1r}}\right)^2) \right. \quad (2.9)$$

2.4.2 Etape 2

Notre modèle :

$$y_i = \dot{x}_1 + \dot{x}_2 + \dot{x}_3 - x_2 - g \quad (2.10)$$

$$y_i = -a_1 \cdot \left(\frac{x_1}{x_3}\right)^2 + a_2 \cdot x_3 + a_3 \cdot \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1^2} + a_4 \cdot U \quad (2.11)$$

$$\left\{ y_i = \begin{pmatrix} -\left(\frac{x_1}{x_3}\right)^2 & x_3 & \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1^2} & u \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \right. \quad (2.12)$$

Alors :

$$y_i = \Phi^T \cdot \theta \quad (2.13)$$

$$\hat{y}_i = \Phi^T \cdot \hat{\theta} \quad (2.14)$$

Et l'erreur devient:

$$\epsilon = y_i - \hat{y}_i \quad (2.15)$$

2.4.3 Etape 3

L'algorithme d'adaptation paramétrique utilisé est la descente du gradient:

Le critère à optimiser est le suivant:

$$J = \epsilon^2(t) \quad (2.16)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (2.17)$$

2.4.4 Etape 4

La commande devient égale à:

$$U = \frac{1}{\hat{g}_x} \cdot (-\hat{f}_x - \lambda_1 \cdot z_1 - \lambda_2 \cdot z_2 - \lambda_3 \cdot z_3 - g - \hat{a}_1 \cdot \left(\frac{x_{3r}}{x_{1r}}\right)^2) \quad (2.18)$$

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées, à la synthèse de la commande non linéaire de type *Backstepping* et *Backstepping adaptative*. Nous avons vu la partie théorique de ces deux commandes non linéaires.

Nous avons fait des changements de variable pour simplifier la synthèse. Le prochain chapitre sera dédié à l'implémentation de ces commandes.

Chapitre 3

Implémentation et résultats

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus lors de l'implémentation des commandes non linéaire présentées dans le chapitre 2 sur le système à lévitation magnétique. Nous allons faire une étude comparative entre la commande par *Backstepping* et la commande par *Backstepping adaptative* dans le cas d'une erreur de modélisation.

3.2 Les paramètres du système

Les valeurs des paramètres du système sont:

- $m=0.068$ Kg,
- $R= 10$ Ohm,
- $L=0.4125$ H,
- $C=0.00653$ F,
- $g=9.81$ m/s^2 .

3.3 Backstepping

Nous prenons comme référence :

- $x_{1r} = 2$,
- $x_{2r} = 0$,
- $x_{3r} = 21$.

Et les valeur des λ_i sont:

- $\lambda_1 = 700$
- $\lambda_2 = 500$
- $\lambda_3 = 150$

3.3.1 Commentaire

Les résultats de simulation montrent qu'on a des bons résultats en terme de stabilité et de poursuite de référence.

Le temps de réponse du système dépend des paramètres λ_i choisis pour la construction de la fonction de Lyapunov. Ces paramètres ont été choisis afin d'éviter les oscillations au régime permanent.

La position de la balle (Fig 3.2), la vitesse (Fig 3.3) et le courant dans la bobine (Fig 3.4) sont asymptotiquement stables et convergent vers la référence. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de cette méthode de commande.

La figure 3.6 montre que l'approche *Backstepping* permet de stabiliser le système dans le cas d'une perturbation sur la sortie, mais elle n'assure pas la poursuite de référence.

3.3.2 Résultats de simulation

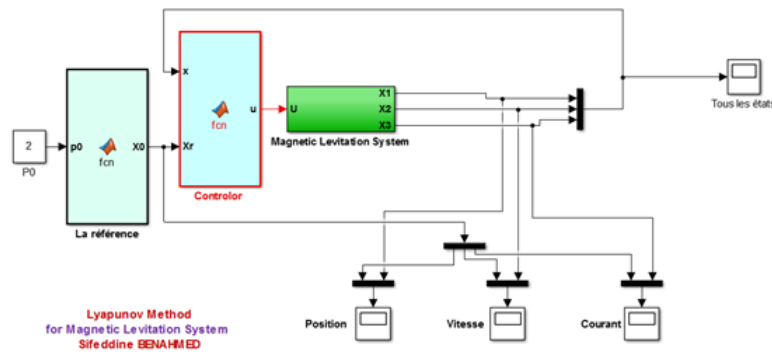


Figure 3.1: Le modèle simulink.

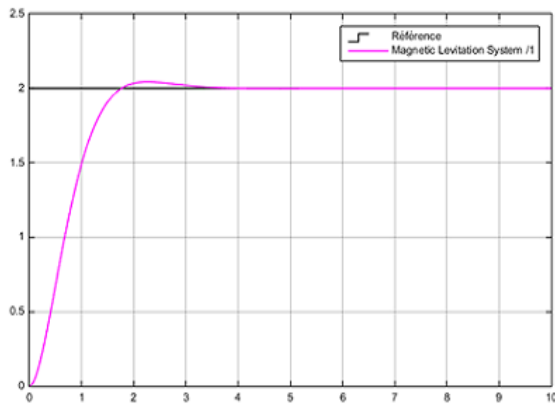


Figure 3.2: La position de la balle.

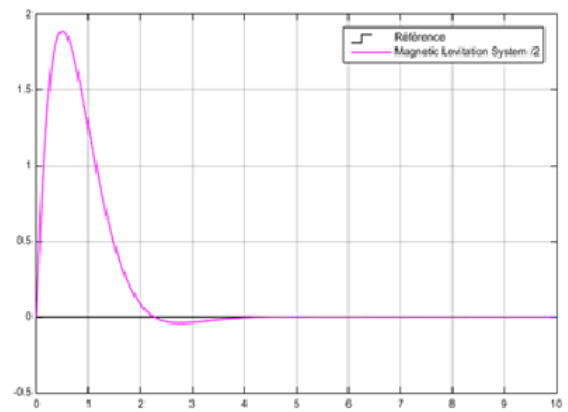


Figure 3.3: La vitesse de la balle.

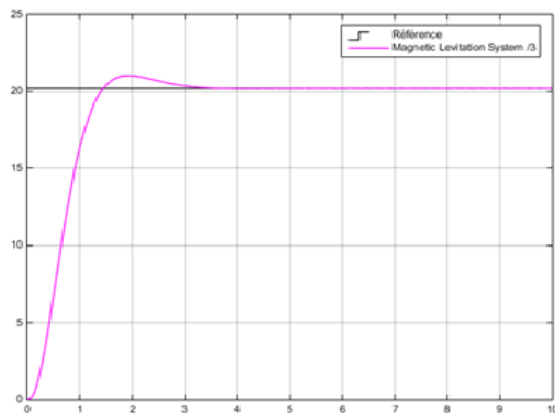


Figure 3.4: L'intensité du courant.

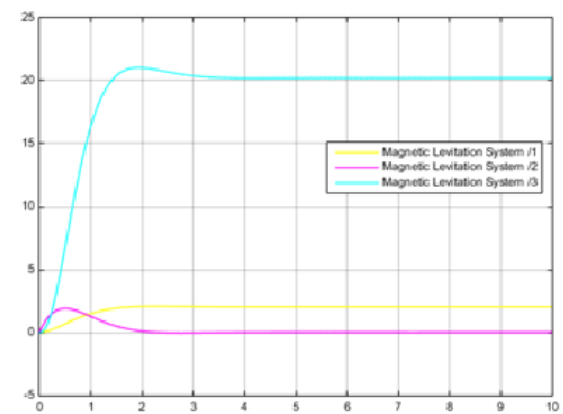


Figure 3.5: tous les états.

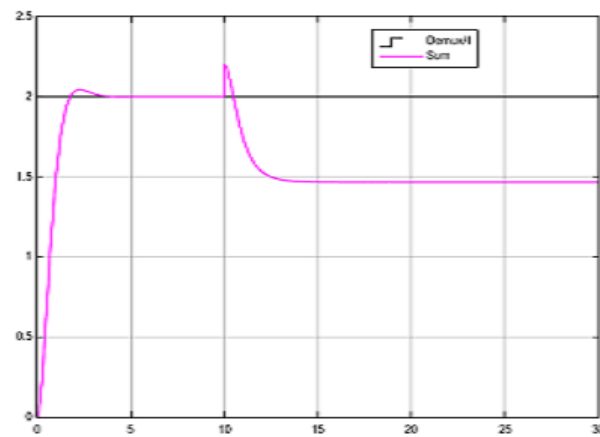


Figure 3.6: Backstepping avec une perturbation.

3.4 Backstepping Adaptative

L'algorithme d'adaptation paramétrique utilisé est la descente du gradient. Nous prenons comme référence :

- $x_{1r} = 0.1$,
- $x_{2r} = 0$,
- $x_{3r} = 1.01$.

Et les valeur des λ_i sont:

- $\lambda_1 = 700$
- $\lambda_2 = 500$
- $\lambda_3 = 150$

3.4.1 Commentaire

La figure 3.12 montre la rapidité de la convergence vers les valeurs réelles de l’algorithme d’adaptation paramétrique pour l’estimation des paramètres du système. Les résultats de simulation montrent qu’on a des bons résultats en terme de stabilité et de poursuite de référence.

La position de la balle (Fig 3.8), la vitesse (Fig 3.9) et le courant dans la bobine (Fig 3.10) sont asymptotiquement stables et convergent vers la référence. Les résultat de simulation montre l’efficacité de cette méthode de commande.

3.4.2 Résultats de simulation

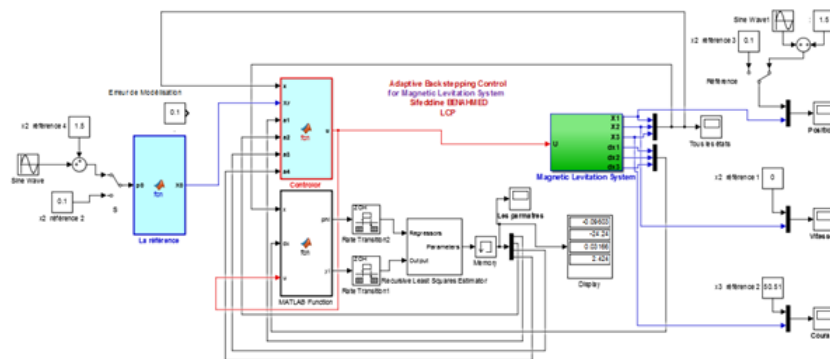


Figure 3.7: Le modèle Simulink.

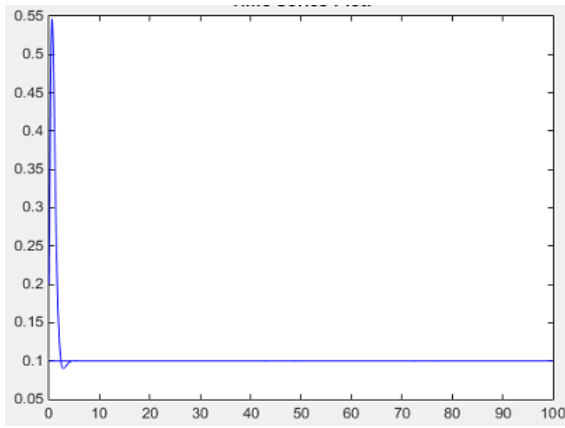


Figure 3.8: La position de la balle.

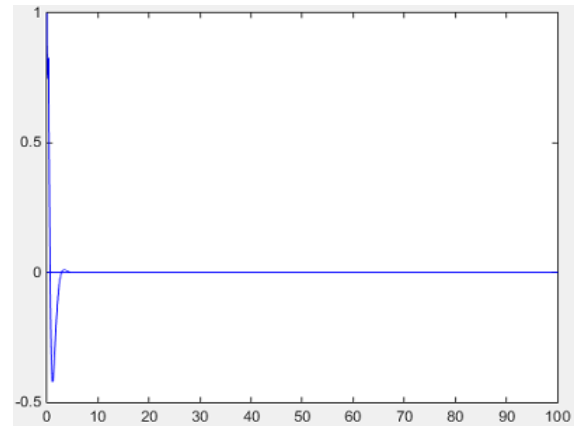


Figure 3.9: La vitesse de la balle.

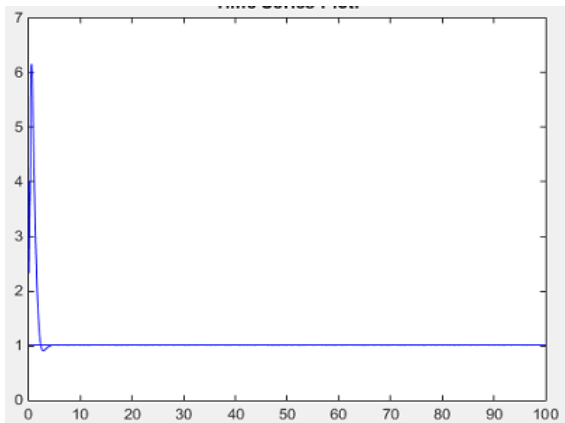


Figure 3.10: L'intensité du courant.

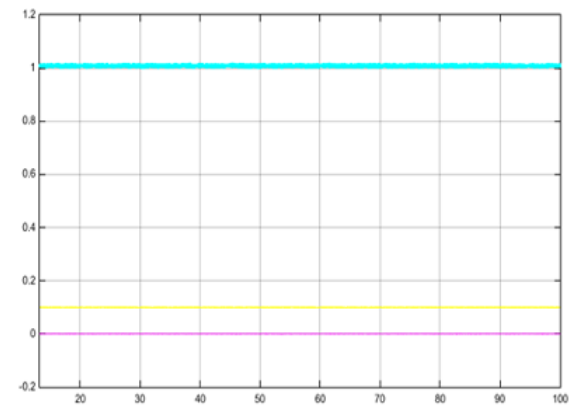


Figure 3.11: Tous les états.

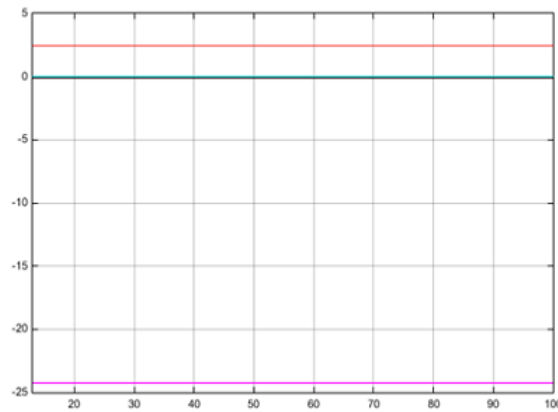


Figure 3.12: Paramètre identifiés.

3.5 Etude comparative

3.5.1 commentaire

Les figure (3.13 et 3.14) montrent que l'approche *Backstepping* toute seul ne permet pas d'annuler l'effet de l'erreur de modélisation (additive), on voit bien que le système diverge. Tandis que l'approche *Backstepping* adaptative permet d'annuler cette erreur et d'assurer la

stabilité du système.

3.5.2 Résultats de simulation

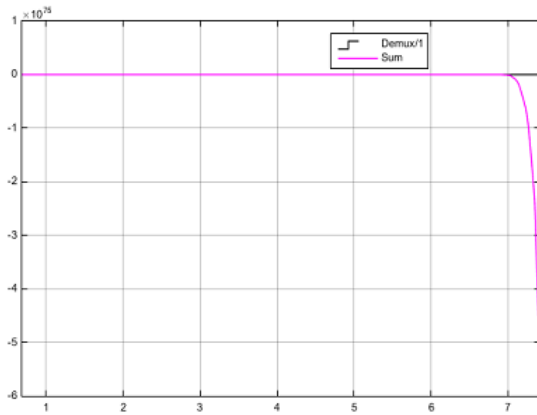


Figure 3.13: Backstepping et erreur de modélisation.

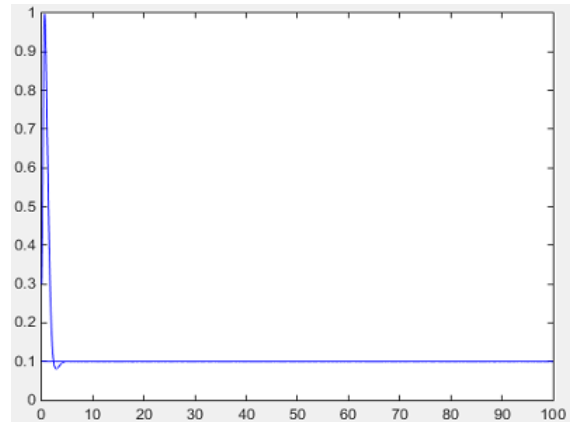


Figure 3.14: Backstepping adaptative une erreur de modélisation.

3.6 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux qu'a donnés la commande par backstepping et la commande Backstepping adaptative.

Nous avons vu que les deux approches manifestent de très bonnes performances en terme de stabilité, alors que l'approche Backstepping adaptative est plus robuste vis-à-vis les erreurs de modélisation.

Conclusion générale et perspectives

Bien que la commande de la plus parts des systèmes magnétiques ou bien électromagnétiques actuels soit encore conçue à partir des théories de l'automatique linéaire, des méthodes plus avancées tenant compte du caractère non linéaire doivent être envisagée pour les applications exigeant de grandes performances dynamiques telles que la précision et la rapidité. Dans cette perspective, l'objectif de notre mémoire était l'application de deux lois de commande non linéaires sur le système à lévitation magnétique. Les lois de commande adoptées sont l'approche backstepping et backstepping adaptative.

Dans le premier chapitre, on s'est intéressé à la présentation du système à lévitation magnétique et son principe de fonctionnement, ainsi que sa modélisation. Nous avons constaté que le modèle du système est fortement non linéaire ce qui exige des lois de commande bien synthétisées.

Ainsi, dans le deuxième chapitre, on a présenté l'aspect théorique ainsi que la synthèse des lois de commande proposées : il s'agit de la commande par backstepping et la commande adaptative. Nous avons fait des changements de variables afin de simplifier la synthèse.

Dans le dernier chapitre nous avons fait l'implémentation des lois de commande synthétisées sur le système à lévitation magnétique, nous avons aussi présenté les différents résultats de simulation trouvés.

À travers les résultats trouvés, nous avons constaté que l'approche Backstepping donne d'excellents résultats en terme de stabilité, mais elle exige une connaissance de tous les paramètres du système, ainsi si une erreur de modélisation se présente le système diverge carrément. Pour régler ce problème, nous avons combiné entre la commande par Backstepping et la commande adaptative ce qui nous donné des bons résultats dans le cas d'une erreur de modélisation additive.

Concernant les perspectives futures de ce travail on propose :

- D'appliquer les lois de commande synthétisée sur le système réel.
- D'appliquer d'autres lois de commande robustes comme la commande par *mode de glissement*.
- Pour obtenir un modèle mathématique beaucoup plus performant, nous proposons d'utiliser l'identification du système au lieu du modèle analytique.

Bibliographie

- [1] F. L. Lewis C. Kwan. Robust backstepping control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2002.
- [2] G.Sedaghat I.Hassanzadeh, S.Mobayen. Design and implementation of controller for magnetic levitation system. Technical report, University of Tebriz,Iran, 2003.
- [3] MUHAMMAD AKRAM JAVAID ISHTIAQ AHMAD. Nonlinear model and controller design for magnetic levitation system. Technical report, University of Engineering and Technology, Taxila, 2004.
- [4] Adam Kumpf. Magnetic levitation system. Technical report, Massachussets institute of technology (MIT) USA, 2003.
- [5] M.Tadjine. Cours d'automatique avancée. Technical report, Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [6] Gerulf K.M. Pedersen Zhenyu Yang and Jørgen H. Pedersen. Model-based control of a nonlinear one dimensional magnetic levitation with a permanentmagnet object. Technical report, Esbjerg Institute of Technology, Aalborg University Denmark, 2004.