

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et de la Technologies  
Département d'Automatique et de l'Électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Automatique*

**Spécialité :** *Automatique et systèmes*

**Par :** HOUARI abderrouf

MAATALLAH keltuom

## Thème

*Commande sans modèle des systèmes non-linéaires  
avec applications*

Soutenu publiquement le : 12/06/2021

Devant le jury :

<b>BEN CHAABANE Achour</b>	M.A.A	Univ .Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>NACER Hacene</b>	M.C.B	Univ .Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>MOSBAH Charaf Abdelkarim</b>	M.C.A	Univ .Ghardaïa	<b>Encadrant</b>

Année universitaire 2020/2021

# Remerciements :

*Louange à Dieu Tout-Puissant, qui nous a inspiré patience et persévérance et nous a donné la force et la détermination pour continuer notre carrière académique et sa réussite pour nous dans l'accomplissement de ce travail.*

*Nous te louons, Dieu, et te remercions pour ta grâce et ta grâce, et nous te demandons la justice et la piété. Et du travail dont vous êtes satisfait, et que la paix soit sur son petit ami bien-aimé et fidèle, que la paix soit sur lui, et nous adressons nos sincères remerciements et notre reconnaissance au professeur distingué*

*Dr " **MOSBAH Charaf Abdelkarim** " pour votre gentillesse de superviser cette recherche et élargir sa poitrine et son enthousiasme à avoir ce travail sous une forme complète qui ne soit déformée par aucune carence.*

*Nous demandons à Dieu de le récompenser de tout le bien avant de superviser cela travail simple, les efforts qu'il a faits pour nous, les conseils et les grandes orientations qu'il a prises en poursuivant cette recherche avec intérêt. Dieu a fait le bilan de ses bonnes actions au Jour du Jugement.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à l'administration du Collège des sciences et de la technologie, sinon tous nos honorables professeurs du Département de mécanique, d'électro physique et de mécanique de l'Université de Ghardaïa*

*Abderrouf et Keltoum*

## الملخص :

ان تصميم استراتيجيات التحكم الجديدة التي لا تتطلب نموذج معرفة النظام لا تزال تجذب اهتمام الباحثين في مجال التحكم الالي . وهذه المذكرة تدرج في هذا التوجه الجديد حيث نقدم انظمة تحكم دون نموذج , مستقر وبسيطة للتطبيق. يهدف هذا العمل الي استعمال الجمل الغامضة في التحكم الالي لأنظمة الديناميكية خاصة الأنظمة اللاخطية الممكن تحويلها الى انظمة خطية باستعمال تحويلات لاخطية . هدف التحكم هو جعل مخارج هذه الأنظمة تتبع مسارات مرجعية محددة مسبقا . يتطرق هذا العمل الي التحكم التلاؤمي للأنظمة الديناميكية اللاخطية. القاسم المشترك بين طرق التحكم المدروسة يتمثل في استعمال الجمل الغامضة كمثل عام للدوال المجهولة من أجل الحصول على تمثيل للمعادلة الديناميكية للنظام اللاخطي في بعض الحالات، أو من أجل الحصول على تمثيل لقانون تحكم مثالي مجهول في الحالات الأخرى. بالإضافة إلى هذا، استعملنا طريقة ليابونوف لدراسة استقرار طرق التحكم التلاؤمي المقترحة وقدمنا بعض نتائج المحاكاة العددية لإبراز كفاءة أدائها .

**الكلمات المفتاحية:** تحكم دون نموذج , نمدجة ديناميكية , تحكم تلاؤمي , تحكم غامض , استقرار ليابونوف , الأنظمة غير الخطية , المنطق الضبابي , البندول المقلوب , مصحح PI الذكي , PID

## Résumé :

La conception de nouvelles stratégies de commande qui ne nécessitent pas de modèle de connaissance du système continue de susciter l'intérêt des chercheurs dans le domaine de la commande automatisée. Cette note s'inscrit dans cette nouvelle tendance où nous proposons des systèmes de commande sans modèle, stables et simples à appliquer. Ce travail vise à utiliser des phrases ambiguës dans la commande automatique de systèmes dynamiques, en particulier les systèmes non linéaires qui peuvent être convertis en systèmes linéaires à l'aide de transformations non linéaires. Le but de la commande est de faire en sorte que les sorties de ces systèmes suivent des chemins de référence prédéfinis. Ce travail porte sur la commande adaptative des systèmes dynamiques non linéaires. Le dénominateur commun entre les méthodes de commande étudiées est l'utilisation de phrases floues comme représentant général de fonctions inconnues afin d'obtenir une représentation de l'équation dynamique du système non linéaire dans certains cas, ou afin d'obtenir une représentation d'un idéal inconnu. Loi de commande dans les autres cas. En plus de cela, nous avons utilisé la méthode Lyapunov pour étudier la stabilité des méthodes de commande adaptative proposée, et nous avons présenté des résultats de simulation numérique pour montrer l'efficacité de leurs performances.

**Mots clés :** Commande sans modèle, modélisation dynamique, contrôle adaptatif, contrôle flou, stabilité de Lyapunov, systèmes non linéaires, logique floue, pendule inversé, correcteur PI intelligent, PID

## **Abstract:**

The designs of new commanded strategies that do not require a system knowledge model continues to attract the attention of automated commanded researchers. And this note is in this new direction where we offer systems of commanded without a model, stable and simple to apply. This work is intended to use vague sentences for the automatic commanded of dynamic systems, especially non-linear systems that can beconvertedin to linear systems using misstep conversions. The commanded goal is to make the exits of this impulse follow predetermined reference paths. This work touches on the alternating commanded of non-linear dynamical systems. The communed nominator is that the methods of control considered are the use of vague sentences as the general representative of unknown functions in order to obtain a representation of the semantics of the non-linear system in some cases, or to obtain a representation of an anonymous ideal control law in others. In addition, we used the Leabonov method to study the stability of the proposed harmonic control methods and provided some numerical simulation results to demonstrate their performance efficiency.

## **Key words:**

Model-free command, Dynamic modeling, adaptive command, fuzzy command, Lyapunov stability, non-linear systems, fuzzy logic, inverted pendulum, intelligent PI corrector, PID.

---

# Table des matières

---

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>I</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>III</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>VII</b>
<b>Liste de Figures .....</b>	<b>IX</b>
<b>Symboles et Notations.....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art sur la commande sans modèle</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Concept de la commande sans modèle .....	3
I.3 Etude bibliographique sur la commande sans modèle .....	4
I.3.1 Commandes PIDintelligents (i-PID) .....	4
I.3.2 Commandeurs PIintelligents (i-PI).....	5
I.4 Commande sans modèle à base de la logique floue .....	6
I.5 La structure générale d'un système flou.....	6
I.5.1 Fuzzification .....	7
I.5.2 des règles 5et mécanisme d'inférence .....	7
I.5.3 Défuzzification .....	7
I.5.4 Avantages et Inconvénients de la logique floue .....	7
I.5.4.1 Les avantages sont .....	7
I.5.4.2 Les inconvénients sont .....	8
I.6 Commande sans modèle à base des réseaux de neurones .....	8
I.6.1 Neurone biologique .....	9
I.6.2 Le neurone formel .....	9
I.6.3 Architecture des réseaux de neurones .....	10
I.6.3.1 Les réseaux non bouclés .....	10
I.6.3.2 Les réseaux de neurones bouclés.....	11

I.6.4 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones .....	11
I.6.4.1 avantages des réseaux de neurones .....	11
I.6.4.2 Inconvénients des réseaux de neurones .....	11
I.7 Commande sans modèle à base de la logique floue / neurones.....	12
I.8 Conclusion .....	13

## **Chapitre II : Modélisation Non-linéaire d'un pendule inversé**

II.1 Introduction .....	15
II.2 types de pendule inversé .....	15
II.2.1 Le pendule inversé sur un chariot .....	16
II.2.2 Le pendule inversé rotatif (pendule de Furuta) .....	16
II.2.3 Le double pendule inversé . .....	17
II.2.3.1 En cascad.....	17
II.2.3.2 En parallèle.....	18
II.2.4 Le pendule inversé stabilisé par volant d'inertie.....	18
II.2.5 Le pendule inversé sur deux roues .....	19
II.3 Conclusion.....	20

## **Chapitre III : Commande non lineaire d' un pendule inverse**

III.1 Introduction.....	22
III.2 commandes des systèmes non linéaires. ....	22
III.2.1 commande backstepping .....	22
III.2.2 feedbacke .....	25
III.2.2.1 Description feedbak .....	25
III.2.2.2 Ou'est-ce que la retroaction (feedback) .....	25
III.2.2.3 Linéarisation par retour d'état (Feedback linearization).....	26
III.2.3 Description du mode glissant.....	27
III.2.3.1 Définition du mode glissant.....	27
III.2.3.2 La commande par mode glissant .....	27

III.3	Representation d'état d'n pendule inverse .....	29
III.3.1	Dérivation des équations cinématiques complètes non linéaires pour le problème classique du pendule inverse.....	29
III.3.2	Modèle simplifié du pendule inverse .....	31
III.3.3	Coordonnées du centre de gravité avec l'axe cartésien.....	31
III.3.4	L'énergie mécanique potentielle est donnée par .....	32
III.3.5	L'énergie mécanique cinétique est donnée par .....	32
III.4	Strict feed back système .....	34
III.5	Résultats de simulation .....	35
III.6	Conclusion .....	37

#### **Chapitre IV Commande sans modèle adaptative floue (CSMAF)**

IV.1	Introduction .....	39
IV.2	logique floue .....	39
IV.3	Logique classique et logique floue .....	39
IV.4	Principe de la commande floue:.....	40
IV.5	Commande floue.....	41
IV.6	Structure d'un commandeur flou .....	41
IV.6.1	Bloc de fuzzification.....	42
IV.6.2	le mécanisme d'inférence .....	42
IV.6.2.1	Méthode de Mamdani .....	43
IV.6.2.2	Méthode de SUGENO .....	43
IV.6.2.3	Méthode de Tsukumoto.....	43
IV.6.3	base des règles .....	44
IV.6.4	Bloc de Défuzzification .....	44
IV.7	Position du problème.....	45
IV.8	Conception d'une commande par modes glissants adaptative floue .....	45

IV.9 Résultats de simulation .....51  
IV.10 Conclusion .....55

**CONCLUSION GENERALE**

**BIBLIOGRAPHIE**

---

## Table des figures

---

<b>Figure I.1</b>	: Structure générale d'un système basé sur la logique floue.....	7
<b>Figure I.2</b>	: Schéma simplifié d'un neurone biologique.....	9
<b>Figure I.3</b>	: Modèle de base d'un neurone forme.....	10
<b>Figure I.4</b>	: Réseau de neurone non bouclé.....	10
<b>Figure I.5</b>	: Réseau de neurone bouclé.....	11
<b>Figure II.1</b>	: Pendule inversé : (a) sur une base mobile (b) sur une base fixe.....	15
<b>Figure II.2</b>	: Schéma de pendule inversé sur un chariot.....	16
<b>Figure II.3</b>	: Schéma d'un pendule inversé rotatif.....	17
<b>Figure II.4</b>	: Schéma d'un double pendule inversé en parallèle.....	17
<b>Figure II.5</b>	: Schéma d'un double pendule inversé double.....	18
<b>Figure II.6</b>	: Schéma d'un pendule inversé stabilisé par volant d'inertie.....	19
<b>Figure II.7</b>	: Schéma d'un pendule inversé sur deux roues.....	19
<b>Figure III.1</b>	: schéma de principe de la commande non adaptative.....	24
<b>Figure III.2</b>	: Procédure de la technique backstepping.....	24
<b>Figure III.3</b>	: Boucle fermée.....	25
<b>Figure III.4</b>	: Boucle ouverte.....	26
<b>Figure III.5</b>	: pendule inversé.....	29
<b>Figure III.6</b>	: la force agissant sur pendule.....	30
<b>Figure III.7</b>	: la force agissant sur le chariot.....	30
<b>Figure III.8</b>	: L'orbite circulaire du Bundle est sous l'influence de la force.....	30
<b>Figure III.9</b>	: pendule inversé.....	31
<b>Figure III.10</b>	: Strict feedback système.....	34
<b>Figure III.11</b>	: Courbe Signal sortie (Y).....	36
<b>Figure III.12</b>	: Courbe de commande U.....	37
<b>Figure IV.1</b>	: Classification selon la logique classique.....	40
<b>Figure IV.2</b>	: Classification selon la logique floue.....	40
<b>Figure IV.3</b>	: Structure générale d'un contrôleur flou.....	41
<b>Figure IV.4</b>	: Méthodes de fuzzification ; (a) singleton, (b) ensemble flou.....	42

<b>Figure IV.5</b>	: Table d'inférence avec cinq sous-ensembles flous.....	43
<b>Figure IV.6</b>	: Les différents modèles d'inférence floue.....	44
<b>Figure IV.7</b>	: Schéma bloc de la commande sans modèle adaptative floue.....	51
<b>Figure IV.8</b>	: Performances de poursuite pour un signal sinusoïdale.....	53
<b>Figure IV.9</b>	: Performances de poursuite pour un signal carré.....	54

---

## Symboles et Notations

---

<b>CSMAF</b>	:	Commande sans modèle adaptative floue
<b>F</b>	:	La force généralisée (N)
<b>L</b>	:	Lagrangien du système (m)
<b>q(t)</b>	:	Les degrés de liberté
<b>F(t)</b>	:	Force exercé sur le chariot (N)
<b>X(t)</b>	:	Position du chariot
<b>U<sub>eq</sub></b>	:	la commande équivalente
<b>X</b>	:	la sortie
<b>U</b>	:	la commande
<b>D</b>	:	Coefficient de frottement de la rotation du pendule
<b>G</b>	:	intensité de la pesanteur ( $m/s^2$ )
<b><math>\theta</math></b>	:	La vitesse angulaire du pendule (rad )
<b>M</b>	:	Masse du pendule (g)
<b>M<sub>c</sub></b>	:	la masse totale du chariot pendule (g)
<b>M<sub>p</sub></b>	:	la masse du pendule (g)
<b>K</b>	:	une constant positive
<b>Sign (.)</b>	:	La fonction signe
<b>x<sub>1</sub></b>	:	la position angulaire du pendule
<b>x<sub>2</sub></b>	:	vitesse angulaire (m/s)
<b>S</b>	:	la surface de glissement. ( $m^2$ )
<b>k<sub>p</sub>, k<sub>i</sub></b>	:	les gains du commandeur
<b>G</b>	:	la pesanteur ( $m/s^2$ )
<b>L</b>	:	demi-longueur du pendule (cm)
<b>M</b>	:	Masse du chariot (g)
<b>R(t):</b>	:	le signal de référence
<b>u(t)</b>	:	le signal de commande
<b>y(t)</b>	:	la sortie du système à commande
<b>E</b>	:	très petite variation

### **INTRODUCTION GENERALE**

La commande des systèmes automatisés a été une avancée majeure au cours des dernières années. Les stratégies de commande peuvent être divisées en deux types "linéaires et non linéaires" [1]. La linéarité dépend du fait que le modèle du système est arrondi autour d'un point de fonctionnement particulier afin que l'analyse et la synthèse des systèmes linéaires puissent être utilisées. La commande automatique non linéaire vise à assurer la stabilité sur une plus large plage de fonctionnement. Parmi les techniques de commande proposées dans la littérature, il y a les lois qui exigent une connaissance préalable du modèle de système à commander et d'autres approches qui n'exigent pas une telle connaissance.

Le monde industriel a encore besoin de nouveaux équipements avec des structures de plus en plus complexes, de sorte que de nouveaux systèmes de développement avec indépendance et intelligence sont devenus une préoccupation majeure de la recherche, qui vise à faciliter la vie humaine. Pour ces systèmes, trouver un modèle qui décrit bien sa dynamique est un véritable défi. Notre principale motivation consiste à concevoir de nouvelles stratégies de commande stables et faciles à mettre en œuvre qui ne nécessitent pas la connaissance de modèles du système. Ce mémoire vise sur le commande sans modèle des systèmes non linéaires avec applications, elle est organisée en quatre chapitres:

- Le chapitre 1 est consacré à l'étude générale des commandes sans modèle où une étude de concept a été menée. Différents approches ont été présentés tels que : la commande à base de logique floue, la commande à base de réseaux de neurones, la commande à base de l'identification.
  - Le deuxième chapitre fournit une étude générale du pendule inversé. Le modèle de ce système est d'une grande importance dans le domaine de commande parce qu'il représente le modèle dynamique d'une grande famille des systèmes physiques. Pour cela, nous avons présenté les différents types de pendule inversé.
  - Dans le chapitre trois, nous avons supposé que le modèle étudié est connu et on cherche à contrôler ce modèle par des commandes non-linéaires. Pour cela, nous avons utilisé la commande par retour d'état.
  - Dans le chapitre quatre, le modèle du système est supposé totalement inconnu et on applique la commande adaptative floue pour le commande

**CHAPITRE I**

**ETAT DE L'ART SUR**

**LA COMMANDE SANS**

**MODELE**

# Chapitre I

---

## Etat de l'art sur la commande sans modèle

---

### I.1 Introduction:

La commande automatisée nécessite des modèles précis. Le modèle est souvent obtenu après plusieurs simplifications qui sont généralement incertains. Les lois de commande calculées ne sont efficaces que pour le modèle nominal. Pour les chercheurs, il est impératif que la loi de commande continue à fonctionner sur le système réel, dont le comportement peut être différent de celui du prototype. Des régulateurs dits puissants sont utilisés pour résoudre ce problème. Pour cela, nous avons proposé une autre solution tout aussi efficace qui est l'utilisation du commande sans modèle, c'est-à-dire le commande en utilisant des mesures des sorties et des entrées du système sur la base du modèle du système. Dans ce chapitre, nous présentons un bref état de l'art sur la théorie de commande des systèmes [2].

### I.2 Concept de la commande sans modèle :

Dans la littérature, on distingue deux familles de commande à savoir:

- Les lois de commande qui nécessitent une connaissance préalable du modèle de système à commander
- Les lois de commande qui n'exigent pas la connaissance du système.

Vu son importance dans le monde industriel, la commande sans modèle ne cesse pas d'attirer l'attention des chercheurs en automatique. De ce fait, un nombre important des stratégies de commande est suggéré dans la littérature. Nous faisons dans cette partie un tour d'horizon sur ces approches. Comme il est difficile de présenter et d'étudier tous les travaux de recherche publiés sur cette thématique, nous allons présenter quelques approches pour les commandes sans modèle développés à base de la logique floue, les réseaux de neurones, commande robuste, et la commande basée sur l'identification ... etc. [3].

### I.3 Commande sans modèle à base de l'identification:

La commande sans modèle est une nouvelle approche proposée par *M. Fliess* et al [4], Cette méthode n'a besoin que des mesures des entrées et des sorties du système que nous voulons commander.

La commande sans modèle repose sur une modélisation locale, sans cesse réactualisée, à partir de la seule connaissance du comportement entrée-sortie du système mesuré. Elle se distingue des identifications de type "boîte noire", telles qu'on les trouve dans la littérature, où l'on cherche un modèle valide sur une plage de fonctionnement aussi large que possible. L'équation différentielle inconnue, décrivant le comportement entrée-sortie, supposé de dimension finie, linéaire ou non [5].

$$\mathbf{E}(\mathbf{y}, \mathbf{y}', \dots, \mathbf{y}^{(a)}, \mathbf{u}, \mathbf{u}', \dots, \mathbf{u}^{(b)}) = \mathbf{0} \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\mathbf{E}$  est une fonction suffisamment régulière de ses arguments. Supposons que pour un entier  $\nu$ ,  $0 < \nu \leq a$ , nous avons  $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{y}^{(\nu)}} \neq \mathbf{0}$

Le théorème des fonctions implicites permet de réécrire localement l'équation (I.1) sous la forme :

$$\mathbf{y}^{(\nu)} = \mathbf{Q}(\mathbf{y}, \mathbf{y}', \dots, \mathbf{y}^{(\nu-1)}, \mathbf{y}^{(\nu+1)}, \dots, \mathbf{y}^{(a)}, \mathbf{u}, \mathbf{u}', \dots, \mathbf{u}^{(b)}) \quad (\text{I.2})$$

On substitue le modèle « phénoménologique », valable sur un court laps de temps.

$$\mathbf{y}^{(\nu)} = \mathbf{F} + \alpha \mathbf{u} \quad (\text{I.3})$$

Où :

$\alpha \in \mathbf{R}$  est un paramètre constant non physique, qui est choisi par l'ingénieur de telle manière que  $\mathbf{F}$  et  $\alpha \mathbf{u}$  sont de la même grandeur à partir des équations (1.3),  $\mathbf{F}$  est déterminé grâce à la connaissance de  $\mathbf{u}$ ,  $\alpha$  et de l'estimation de  $\mathbf{y}^{(\nu)}$ , Le plus souvent on choisit  $\nu = 1$  ou  $2$  et on considère un modèle local simplifié d'ordres  $1$  ou  $2$  [6].

#### I.3.1 Commandes PID intelligents (i-PID) :

- Si  $\nu = 2$

On ferme la boucle avec un régulateur (i-PID) (intelligent Proportionnel-Intégral Dérivé) :

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{F}}{\alpha} + \frac{\mathbf{y}_r}{\alpha} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \mathbf{e}' \quad (\text{1.4})$$

- Si  $\dot{y} = 1$

On ferme la boucle avec un régulateur (i-PI) dont la commande est donnée par :

$$\mathbf{u} = -\frac{F}{\dot{a}} + \frac{y_r}{\dot{a}} + Kp\mathbf{e} + Ki \int \mathbf{e} \quad (1.5)$$

Où :

- $Y_r$  Est la trajectoire de référence de la sortie, obtenue selon les préceptes de la commande par platitude
- $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_r$  Est l'erreur de poursuite
- KP.KI. KD sont les gains de réglage [7].

### I.3.2 Commande PI intelligents (i-PI) :

Supposons que  $\mathbf{v} = 1$  dans l'équation (1.3) :

Si  $\dot{y} = 1$  la boucle est fermée avec un régulateur (intelligent Proportionnel-Intégral) (i-PI) :

Utiliser :  $\mathbf{y}^{(1)} = F + \dot{a}\mathbf{u}$  et le commande PI intelligent, i-PI [8].

$$\dot{\mathbf{y}} = -[\mathbf{F}]_e + \mathbf{y}_r + \mathbf{PI}(e)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{F}{\dot{a}} + \frac{y_r}{\dot{a}} + Kp\mathbf{e} + Ki \int \mathbf{e} \quad (1.5)$$

Où :

- $[\mathbf{F}]_e = [\mathbf{y}]_e - \dot{\mathbf{y}}$
- $y_r$  Trajectoire de référence.
- $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_r$
- $\mathbf{PI}(e)$  est un commande PI habituel.

Cette commande sans modèle proposée par *Fliess* et ses collaborateurs ont proposé un modèle fictif qui conserve la simplicité de régulateur classique. Il réduit également la commande d'un système inconnu à un système d'intégration simple ou double. La dynamique incertaine du système à commander donne au commande une sorte d'auto-adaptation et de durabilité, ce qui améliore les performances de commande. Ces auteurs on présenté cette stratégie de commande comme un PID intelligent qui présente les mêmes avantages que le PID classique, en termes de simplicité de conception, il excelle à nouveau dans les applications industrielles. Cependant, l'idée principale de cette méthode est d'approcher

Instantanément la dynamique d'un système inconnu à travers un système simple ou double, ne semble pas toujours réaliste, surtout pour les systèmes d'ordre supérieur. Puisqu'il n'y a pas de manière systématique de faire cela, la sélection du paramètre non physique  $\alpha$  peut poser des problèmes.

Un mauvais choix de ce paramètre de conception peut dégrader les performances de commande (la stabilité de la boucle fermée). Pour l'action dérivée aussi, le choix de la taille de la fenêtre temporelle d'estimation est un vrai challenge : une fenêtre large donne une bonne estimation, mais avec un retard, et complique aussi l'implémentation en temps réel. Par contre, une petite fenêtre facilite l'implémentation mais l'estimation est moins performante. Cette approche peut conduire à des valeurs divergentes de  $U$  pour  $T$  grand et donc à des valeurs numériquement inadmissibles de  $F$  [3].

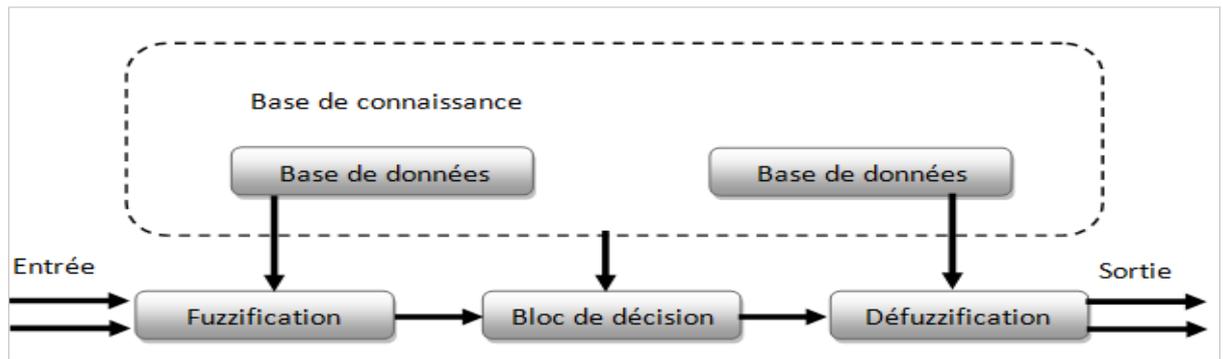
#### **I.4 Commande sans modèle à base de la logique floue :**

La logique floue est devenue un domaine de recherche très important. Dans les systèmes de commande, en particulier l'électrotechnique. La grammaire est utilisée pour permettre une traduction facile [9]. La logique floue est une technique d'intelligence artificielle qui permet de modéliser les connaissances d'un expert humain qui a un commande complet sur le système à commander. L'importance de la logique floue est qu'elle peut exprimer des informations imprécises en s'approchant de la pensée humaine [10].

Le développement d'une commande décentralisée est basé sur la logique floue du système MIMO. Instable dans un anneau ou vert et forme des anneaux convergents. Les paramètres de ce commande sont optimisés par un algorithme génétique. [2] Pour que l'algorithme de commande soit basé sur des règles ambiguës, toutes les règles de commande sont liées aux concepts d'enrobage, de formation ambiguë et de règles d'inférence floue. La console classique de logique floue en quatre parties, l'obscurcissement, la base de règles, le moteur d'inférence et la Défuzzification [11].

#### **I.5 La structure générale d'un système flou:**

La mise en œuvre d'un système basé sur la logique floue Fait apparaître les quatre modules principaux la figure suivante:



**Figure I.1** : Structure générale d'un système basé sur la logique floue

**I.5.1 Fuzzification:** Il sert à transformer les variables numériques non floues provenant des entrées en variables linguistiques floues. La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrées et de sortie. Dans le cas de réglage par la logique floue, on utilise en général des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenances [10].

**I.5.2 Règles et mécanisme d'inférence:** à partir de la base des règles fournie par l'expert et les sous-ensembles flous des entrées et de sorties correspondants à la fuzzification, le mécanisme d'inférence effectue une relation entre les fonctions d'appartenances des entrées et les fonctions d'appartenances de sorties [10].

**I.5.3 Défuzzification** : la défuzzification c'est l'inverse de l'opération de fuzzification. est la dernière étape d'un commande flou; elle effectue la conversion des valeurs floues en une sortie numérique [12].

#### **I.5.4 Avantages et Inconvénients de la logique floue:**

##### **I.5.4.1 Les avantages sont :**

- La non-nécessité d'une modélisation du système à régler.
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistique) de l'opérateur de processus.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- La non-nécessité d'une modélisation du système à régler.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser) .

- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- Robustesse vis-à-vis les incertitudes de modélisation.

#### **I.5.4.2 Les inconvénients sont :**

- Aucunes méthodes formelles pour l'ajustement.
- Les performances dépendent de l'expertise.
- Le manque de directive précise pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification). L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile) [10] [11].

Dans ce dernier ; le régulateur flou a de très bonnes performances dynamiques et il est en outre robuste aux changements de paramètres du modèle. Cela revient au fait que la synthèse du commande flou ne repose pas sur la connaissance préalable du modèle de synthèse décrivant la dynamique réelle du système à commander. Le principal inconvénient de cette technique est le manque de directives précises pour la conception d'ajusteurs flous. Nous reviendrons à la logique floue avec plus de détaille dans le quatrième chapitre.

#### **I.6 Commande sans modèle à base des réseaux de neurones :**

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943, ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés. Ils ont connu des débuts prometteurs vers la fin des années 50, mais le manque d'approfondissement de la théorie a gelé ces travaux jusqu'aux années 80 [10]. Et Basé sur l'adaptabilité du réseau de neurones, chercheurs ont proposé un régulateur flou adaptatif. Cette technique permet aux commandes floues adaptatives d'atteindre un fonctionnement optimal sur une très large gamme [12].

Les réseaux de neurones forment une famille de fonctions non linéaires, permettant de construire, par apprentissage, une très large classe de modèles et de commande. Un réseau de neurones est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, qui sont en fait les activités de certains neurones [13]. Le réseau de neurones est utilisé dans toutes sortes d'applications et dans tous les domaines. Résoudre des problèmes de modélisation, de reconnaissance et de commande de processus non linéaires et complexes [10].

Les réseaux de neurones sont utilisés pour concevoir un commandeur adaptatif à modèle de référence. L'un de ces réseaux est utilisé comme un identificateur de la dynamique du système à commander et l'autre comme un commande. Les deux réseaux de neurones, identificateur et commande, n'nécessitent un apprentissage hors ligne ce qui représente, en effet, un inconvénient pour cette approche [2].

### I.6.1 Neurone biologique :

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone.

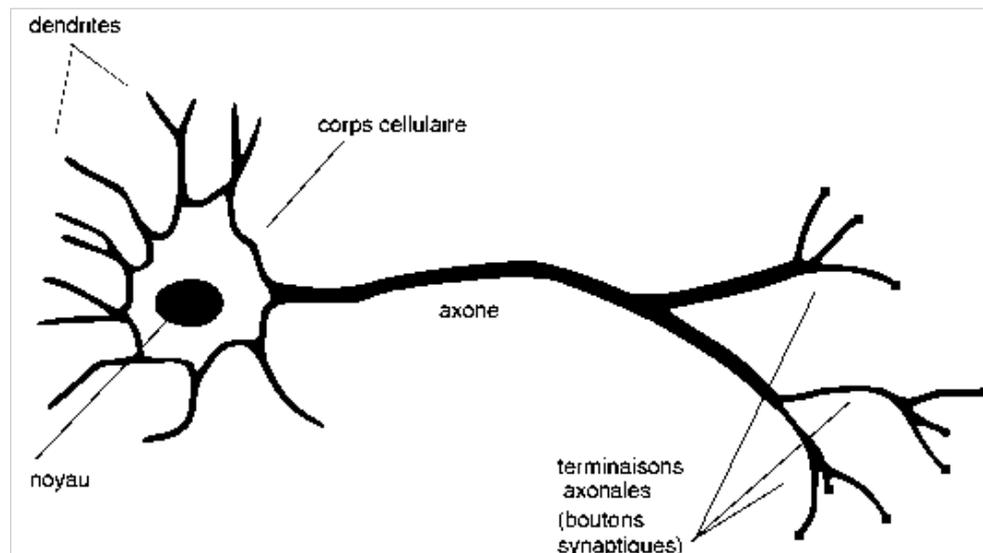


Figure I.2 : Schéma simplifié d'un neurone biologique

### I.6.2 Le neurone formel :

Un neurone formel est une fonction algébrique non linéaire et bornée. Les modèles les plus utilisés sont basés sur le modèle développé par Mac Culloch and Pitt. Le neurone peut être représenté par une cellule possédant plusieurs entrées et une sortie.

Représente un modèle de base d'un neurone formel :

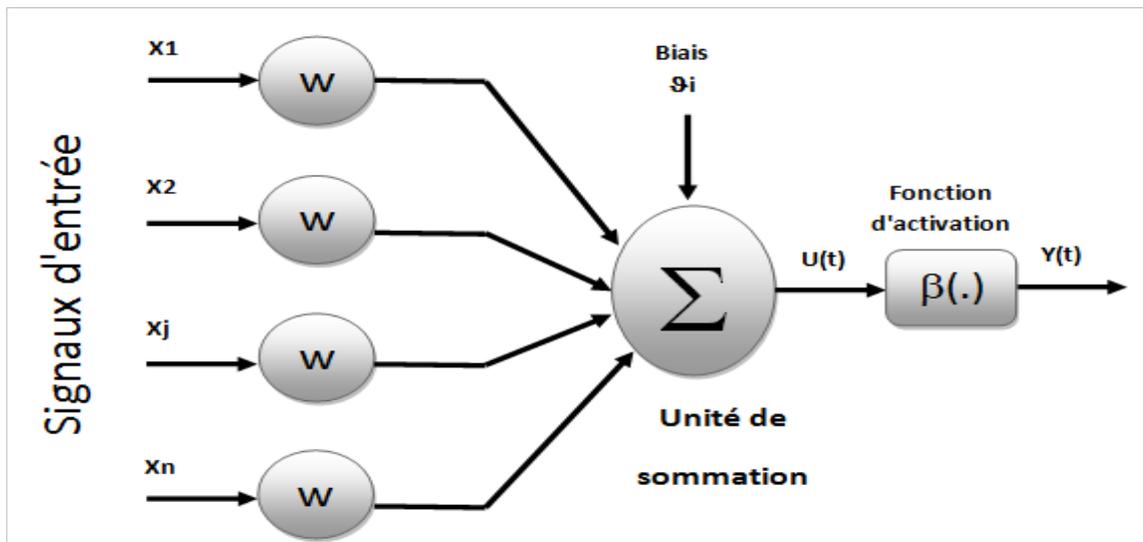


Figure I.3 : Modèle de base d'un neurone forme

### I.6.3 Architecture des réseaux de neurones formels :

#### I.6.3.1 Les réseaux non bouclés :

On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés. Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feedforward). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Si tous les neurones ne sont pas des organes de sortie, on parle de neurones cachés [13].

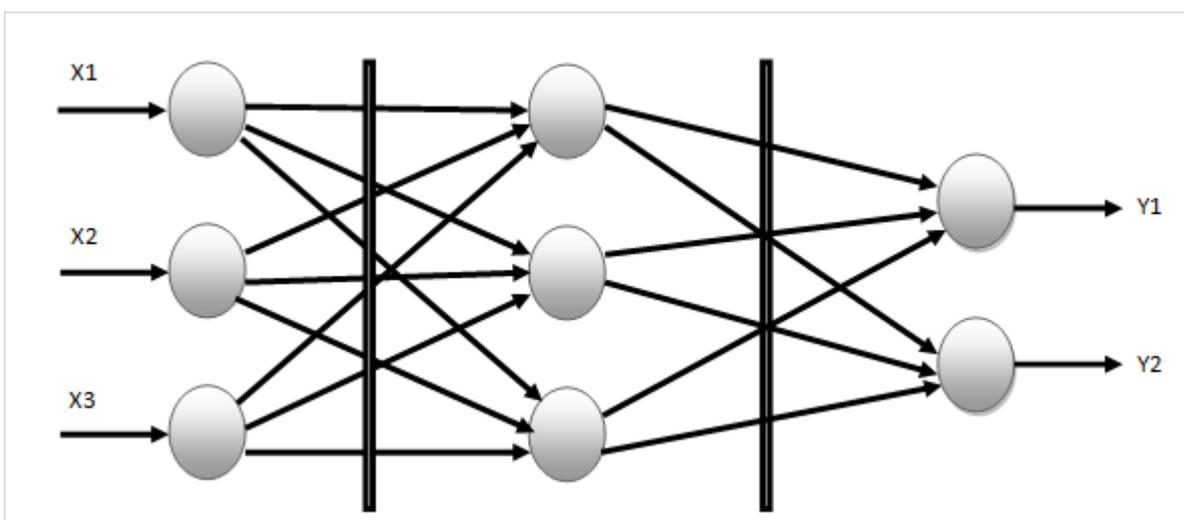


Figure I.4 : Réseau de neurone non bouclé.

### I.6.3.2 Les réseaux de neurones bouclés :

Un réseau est bouclé, ou dynamique, si son graphe possède au moins un cycle .Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière, feedback network ou récurrent network

(Figure I.5).

### I.6.4 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

#### I.6.4.1 Avantages réseaux de neurones :

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe.
- partir d'exemples représentatifs, par rétro propagation des erreurs. L'apprentissage (Ou construction du modèle) est automatique.
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- Simple à manier.

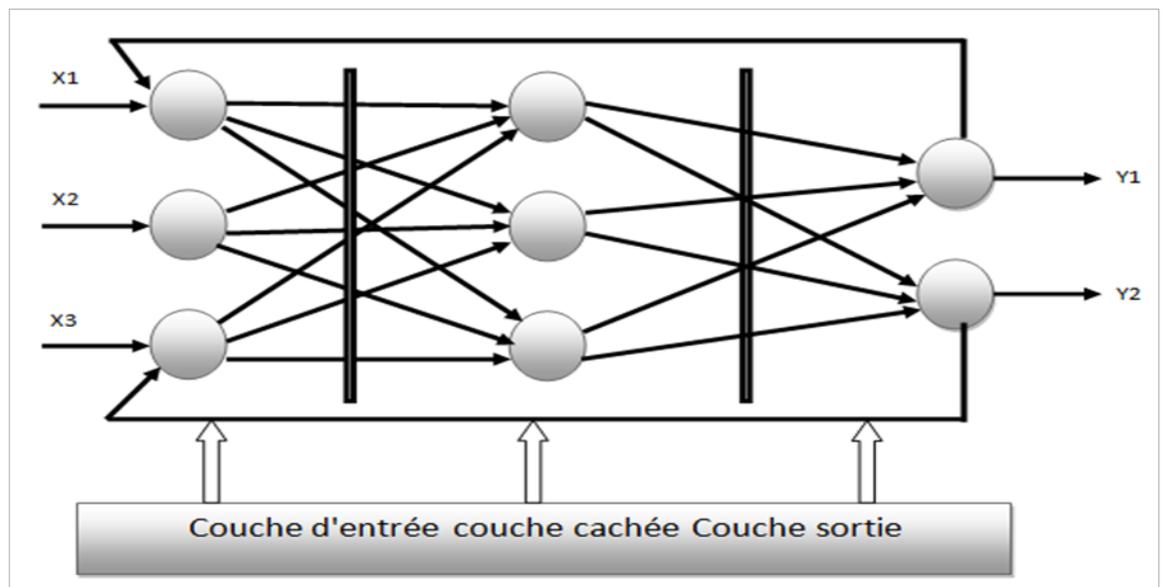


Figure I.5: Réseau de neurone bouclé

#### I.6.4.2 Inconvénients des réseaux de neurones :

- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur.
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation)

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer [13].

Le réseau de neurones feedforward est utilisé comme structure de réseau pour l'euro-commande et l'algorithme de Levenberg-Marcadet est appliqué comme algorithme d'apprentissage [14]. Il est difficile de résoudre le problème de commande d'un système non linéaire complexe dans les domaines industriels. Des méthodes de commande ont été présentées, parmi lesquelles l'unité de réseau neuronal PID a été identifiée comme une unité du système non linéaire dans cette région. Le meilleur algorithme d'optimisation de l'essaim de particules PSO a été utilisé pour initialiser le réseau neuronal PID, améliorer la vitesse de convergence et empêcher les poids dans la zone locale, et la commande de réseau neuronal adaptatif PID a été développée, basée sur un réseau neuronal en utilisant uniquement l'algorithme d'optimisation et les poids initiaux sont mis à jour sous forme d'OEP ou PSO en utilisant la méthode de régression optimisée dans ce réseau. Il est important de souligner que

Pour les approches de commande sans modèle basées sur les réseaux de neurones, le principal inconvénient réside dans le choix de la structure du réseau et le nombre important de paramètres à ajuster [2] [15].

### **I.7 Commande sans modèle à base de la logique floue / neurones:**

Les réseaux de neurones et la logique floue sont deux concepts totalement inspirés du raisonnement humain. Bien que ces deux modèles numériques soient différents du point de vue structure, ils possèdent de nombreux points communs. En effet, l'utilisation de ces deux techniques ne nécessite pas de modèle mathématique bien défini car la résolution se base sur les valeurs numériques des entrées et des sorties pour les réseaux neuronaux et sur la logique floue du système dans le cas de la logique floue.

De plus, les résultats sont généralement incertains. En revanche des deux techniques peuvent accomplir des tâches complémentaires. La logique floue fournit des connaissances avec un certain degré d'incertitude et les réseaux de neurones peuvent modéliser et reproduire l'apprentissage humain, d'où l'idée de combiner ces deux techniques pour créer un système artificiel intelligent qui résout les problèmes de manière proche de celle de l'être humain.

Cela permet de s'adapter aux nouvelles situations et aux nouvelles règles. Des techniques de logique floue peuvent être introduites dans les réseaux de neurones afin

D'améliorer l'expressivité et la résilience du réseau, la simplicité de connaître le mystérieux du réseau. La main et la capacité d'apprendre des réseaux de neurones d'autre part [16].

### **I.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons introduit le concept général de la commande sans-modèle et nous avons décrit les différentes techniques de commande qui ont été proposées dans la littérature. La commande sans modèle a été présentée comme étant une technique spéciale de calcul des paramètres en temps réel du régulateur sans connaissance préalable du modèle mathématique en utilisant.

**CHAPITRE II**  
**MODELISATION NON-**  
**LINEAIRE D'UN**  
**PENDULE INVERSE**

# Chapitre II

---

## Modélisation Non-linéaire d'un pendule inversé

---

### II.1 Introduction

Avant d'aborder le problème de commande d'un système sans modèle, il est nécessaire de collecter toutes les informations possibles sur ce système afin de formuler un modèle mathématique qui sera d'une grande importance dans la conception des lois de commande. Pour cela nous avons choisissons le modèle mathématique du pendule inversé parce que il est très important.

### II.2 Types de pendule inversé :

Un pendule inversé est une tige qui repose dans une position d'équilibre instable sur une base fixe ou mobile (Figure II.1). Le problème de commande d'un pendule inversé consiste à maintenir, ce dernier, dans sa position d'équilibre instable ( $\theta = 0$ ) lorsque le pendule est incliné vers la gauche, la commande doit l'amené vers la droite et vice versa [17].

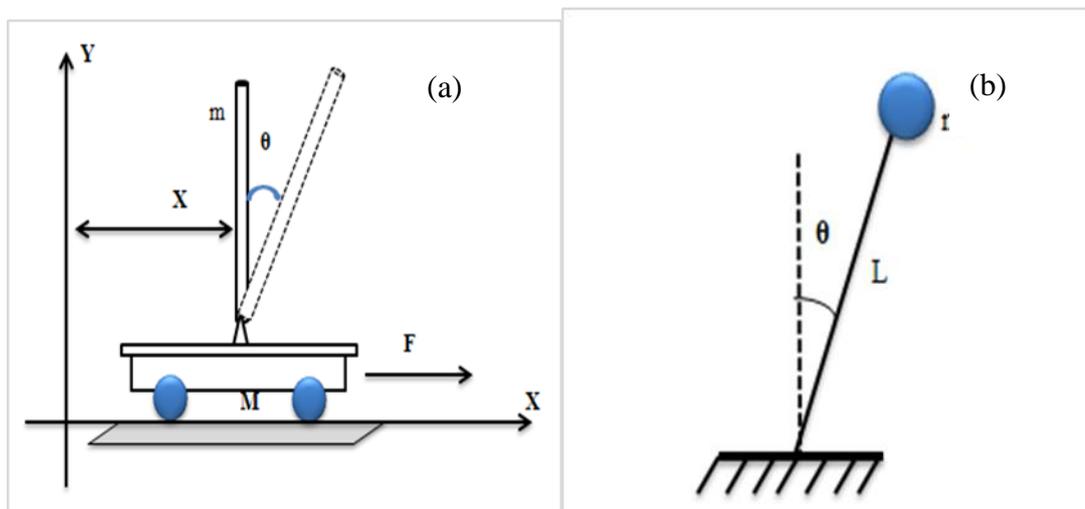
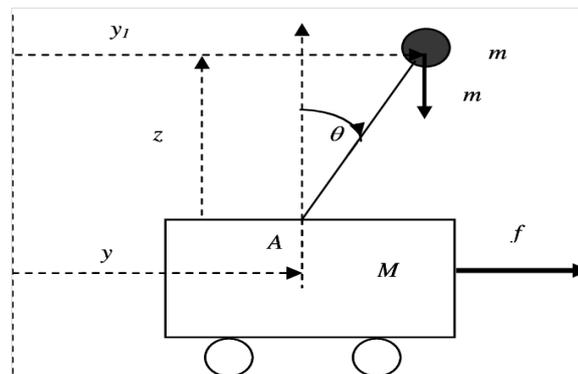


Figure II.1 : Pendule inversé : (a) sur une base mobile (b) sur une base fixe

Ces dynamiques sont non-linéaires et instables pour cela le pendule est considéré comme exemple très intéressante et largement étudiée dans la théorie de commande. Plusieurs approches ont été appliqués à ce système tels que : les réseaux de nuerons, la logique floue, et les algorithmes génétiques ... etc. Selon la classification précédente on distingue différents types de pendules inversé : pendule inversé simple, pendule inversé double, pendule rotatif inversé...etc.

### II.2.1 Le pendule inversé sur un chariot:

Ce système mécanique est constitué d'un chariot qui se déplace horizontalement sur un rail de guidage et une tige fixée su ce chariot perpendiculairement. Ce système est considéré comme un pendule de longueur ( $l$ ) et de masse ( $m$ ) dont l'axe de suspension est relié au palier du bloc ( $M$ ) sur un axe horizontal (voir Figure II.2).



**Figure II.2:** Schéma de pendule inversé sur un chariot

Au départ, le système est en état de repos. En exerçant une force horizontale ( $f$ ) sur le chariot, le chariot fait une translation ( $y$ ) et le pendule inversé fait une rotation d'un angle ( $\theta$ ) [18].

Le but de la commande sera de ramener le pendule de sa position initiale (sa position d'équilibre instable) et de le maintenir autour de cette position.

### II.2.2 Le pendule inversé rotatif (pendule de Furuta) :

Ce pendule a été conçu par **Katsuhisa Furuta**, il est constitué d'un levier tournant dans le plan horizontal relié à son extrémité par un pendule inversé dans un équilibre est fixe et maintenu dans position autour de la perpendiculaire au point d'équilibre instable [19].

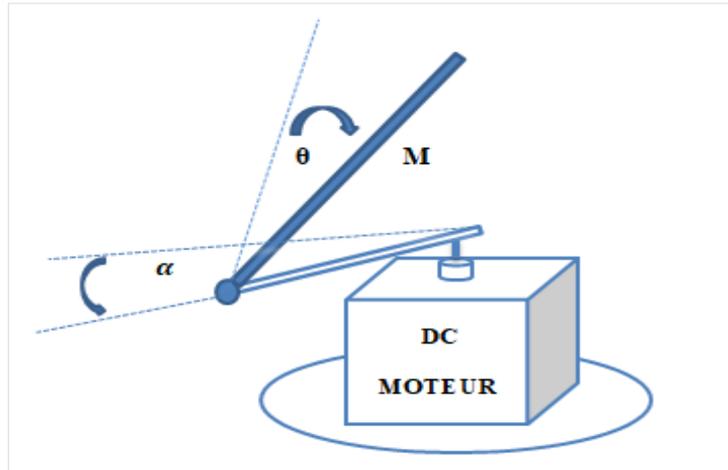


Figure II.3 : Schéma d'un pendule inversé rotatif.

### II.2.3 Le pendule double inversé :

Il existe deux types :

#### II.2.3.1 En parallèle :

Il est composé de deux tiges indépendantes: ( $l_a$  et  $l_b$ ) qui sont en rotation libre. au déplacement  $x(t)$  de la base il générera une déflexion de l'angle  $\theta_1$  par rapport à la colonne sur la première colonne et de l'angle  $\theta_2$  par rapport à la colonne sur la deuxième tige.

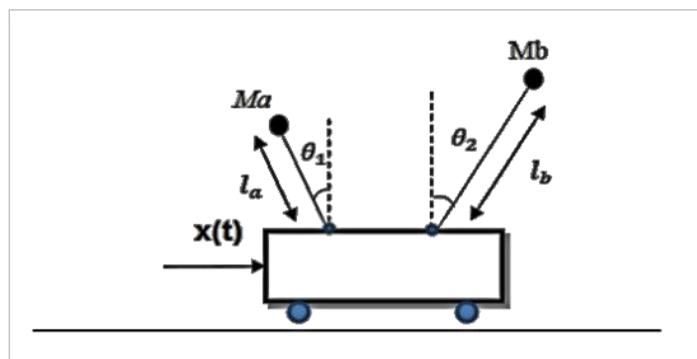


Figure II.4 : Schéma d'un double pendule inversé en parallèle

Le but de la commande est de stabiliser les tiges autour de la verticale au point d'équilibre instable et de les maintenir même en présence de perturbations externes [19].

### II.2.3.2 En cascade:

Il a le même principe que le pendule simple, dispose de deux tiges en rotation libre. L'une tourne autour du pivot à la base, d'un angle  $\theta_1$  et l'autre avec l'angle  $\theta_2$  autour de la deuxième articulation entre les deux tiges.

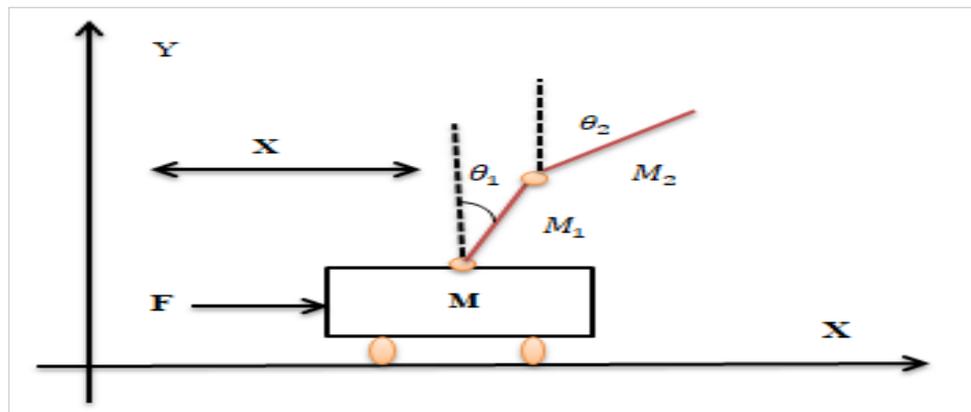


Figure II.5 : Schéma d'un double pendule inversé double

Le but de la commande pour ce système consiste à stabiliser les deux tiges autour de la verticale et les maintenir autour de ce point d'équilibre instable [20][19].

### II.2.4 Le pendule inversé stabilisé par volant d'inertie :

Un pendule inversé en rotation libre autour d'un axe fixé au châssis et d'un volant est une roue dite d'inertie, dont le centre de masse ( $M$ ) coïncide avec l'extrémité du pendule. Ce système fonctionne sur le mouvement de rotation du volant, ce qui produit des effets dynamiques, conduisant à la rotation du pendule.

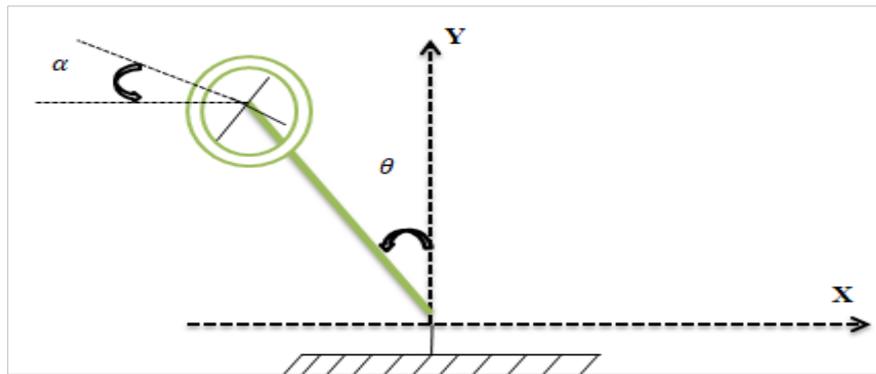


Figure II.6 : Schéma d'un pendule inversé stabilisé par volant d'inertie.

Le but de l'ordre est de maintenir le pendule autour de la verticale au point d'équilibre instable et de le maintenir là [21] [19].

### II.2.5 Le pendule inversé sur deux roues :

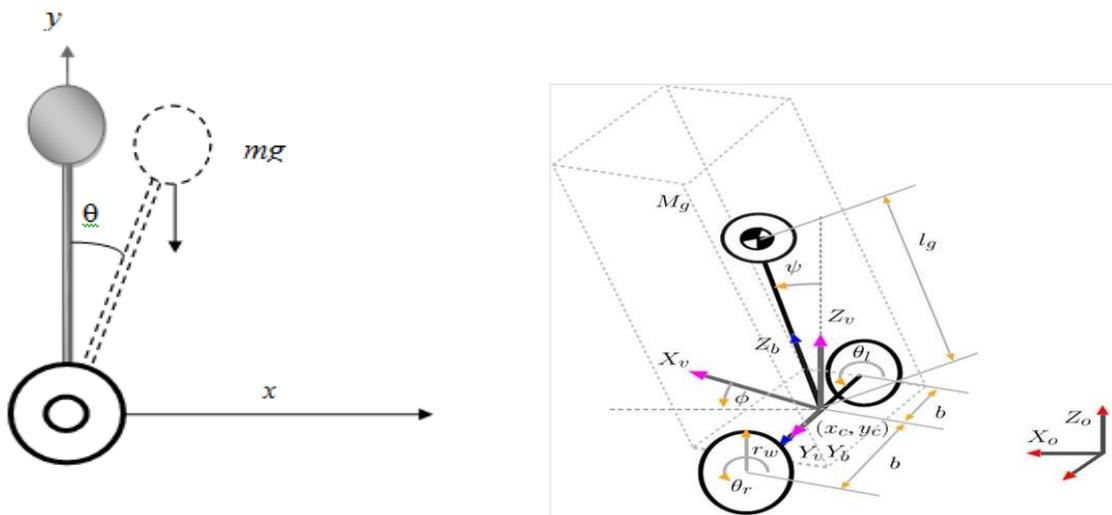


Figure II.7 : Schéma d'un pendule inversé sur deux roues.

il a été largement étudié dans le domaine de l'automatisation. Comme son nom l'indique, il se compose d'une base mobile qui représente l'essieu, de deux roues avec un pendule inversé qui tourne librement autour de l'axe et d'une tige de pendule. Où l'angle d'inclinaison du pendule est déterminé par rapport à la perpendiculaire ( $\phi$ ) lorsque le pendule est incliné L'avant attrape la partie mobile en avançant et vice versa. La difficulté est d'ajuster l'intensité de réaction des roues pour agir contre l'angle que fait le pendule par rapport à la verticale [22].

**II.3 Conclusion :**

Ce chapitre est consacré à quelques généralités sur le pendule inversé. Nous avons commencé par donner et décrire quelques exemples de pendule inversé, Le pendule inversé sur deux roues, Le pendule inversé stabilisé par volant d'inertie, Le pendule double inversé (En parallèle et En cascade), Le pendule inversé rotatif (pendule de Furuta), Le pendule inversé sur un chariot, Types de pendule inversé. avec schèmes explicatifs

**CHAPITRE III**  
**COMMANDE NON**  
**LINEAIRE D'UN**  
**PENDULE INVERSE**

# Chapitre III

---

## Commande non linéaire d'un pendule inverse

---

### III.1 Introduction :

La commande des pendules inversés est un sujet largement abordé dans la littérature de commande. Dans ce chapitre, nous étudions une approche de la théorie de la commande non linéaire qui repose sur une généralisation de la théorie de la commande optimale quadratique linéaire. Cette approche donne des approximations à la commande optimale non linéaire.

La technique de commande peut être facilement appliquée à des versions plus compliquées du pendule inversé et du chariot famille: systèmes de pendule et de chariot inversés à liaisons multiples, ce qui n'a pas été rapporté dans la littérature existant Pendule et les équations de Lagrange pour le système sont dérivées. Équations linéarités du pendule.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

### III.2 commandes des systèmes non linéaires :

Un système non linéaire est l'une des équations non linéaires qui décrivent l'évolution temporelle des variables qui composent le système sous l'influence d'un nombre limité de variables indépendantes (entrées, variables de commande ou commandes), que nous choisissons pour atteindre certains objectifs. De nombreux exemples sont connus parmi les systèmes mécaniques ou chimiques: satellites, avions, voitures, grues, pendules simples ou inversés ...etc. [23] [24].

Des relations d'équivalence peuvent être introduites, donnant des classifications différentes, que les systèmes soit contrôlé ou non. Dans les situations incontrôlées, les comportements sont classés en fonction de la stabilité linéaire et de l'instabilité. Le contrôlé produit des données pour un chemin de référence qui doit être suivi. Un système non linéaire lorsqu'il ne respecte pas le principe de superposition. Les exigences de proportionnalité et de

Combinaison ne s'appliquent plus aux systèmes non linéaires. Il y a plusieurs difficultés [23] L'analyse par des fonctions de transfert est impossible.

- Le concept de poteaux ne peut pas être utilisé.
- La notion des pôles disparaît.
- Le système non linéaire a plusieurs points d'équilibre et sa stabilité est plus complexe que dans la cas. les éléments avec des propriétés non linéaires peuvent être liés dans un système linéaire. pour les systèmes linéaires, il est également possible de distinguer les modèles non linéaires avec les lettres suivantes : .
- à temps continu / à temps discret.
- Invariants dans le temps / variant dans le temps.
- Monovariabiles / multivariable.
- Déterministe / stochastiques.

### **III.2.1 commande backstopping :**

Pour commander un système, il faut s'appuyer sur un modèle parent obtenu précédemment, comme des lois physiques ou des notes, ou à partir d'observations expérimentales antérieures. Le backstepping est une approche qui prend au sérieux et prend en compte la nature non linéaire du système [25].

Le système est divisé en plusieurs sous-systèmes par ordre décroissant. La loi montre le classement dans la dernière étape de l'algorithme de retour en arrière. L'instabilité non linéaire du système est traitée et l'ordre du système augmenté d'une étape à l'autre. La stabilité globale est garantie, elle assure la continuité et la régulation des systèmes non linéaires.

Si les paramètres du modèle sont connus ou non, la commande peut être développée :

La commande de marche arrière n'est ni adaptative ni adaptative. si le modèle est connu, le diagramme schématique montre la commande de marche arrière non adaptative dans la figure ci-dessous [26].

$Y_r$  : Signal de référence.

$Y$  : Sortie.

$U$  : signale de commande.

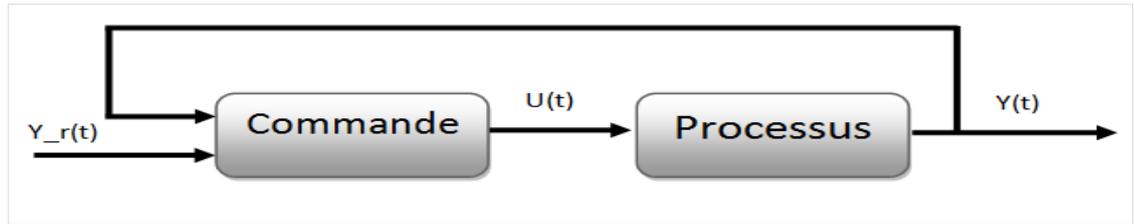


Figure III.1 : schéma de principe de la commande non adaptative

La conception de la commande adaptative nécessite le développement de trois concepts de base:

La loi de commande permet de respecter les spécifications requises concernant le comportement du système à commander.

- La loi d'adaptation dynamique détermine l'estimation des paramètres inconnus.
- La fonction Lyapunov permet de répondre aux exigences des deux concepts précédents et assure également la convergence et la stabilité de l'architecture adaptative à tout moment [26].

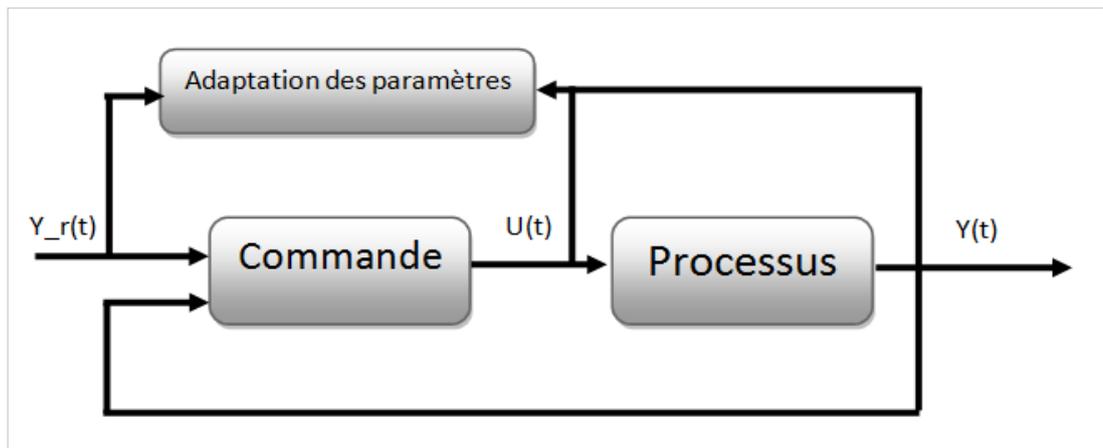


Figure III.2 : Procédure de la technique backstepping

### III.2.2 feedbacks:

#### III.2.2.1 Description feedback:

La commande de position est une surface de glissement non linéaire. la fonction de commande assure la durabilité de la turbulence et des invertit dues qui se produisent, fournit des caractéristiques supérieures, telles que la convergence de temps limitée [27][28].

Surface de glissement la loi de commande peut être déterminée par un commande équivalent.

#### III.2.2.2 Ou' est-ce que la rétroaction (feedback):

Un système dynamique est un système dont le comportement change avec le temps, et c'est souvent une réponse à la stimulation externe ou à la contrainte. Le terme rétroaction fait référence à une situation dans laquelle un groupe de système dynamique connecté les uns aux autres. Et chaque système affecte l'autre, donc leur dynamique est fortement liée. Causalité simple il est difficile de penser à un système de rétroaction car c'est le premier système qui affecte et le reste des systèmes a affecté le premier système, cela rend difficile la réflexion basée sur la cause et l'effet, il faut donc l'analyser le système dans son ensemble. Le résultat est que le comportement des systèmes de rétroaction il est souvent insignifiant, et il est donc nécessaire de recourir à des méthodes formelles pour les comprendre [29]. La figure souvent illustre sous forme de schéma fonctionnel l'idée de rétroaction. On utilise souvent :

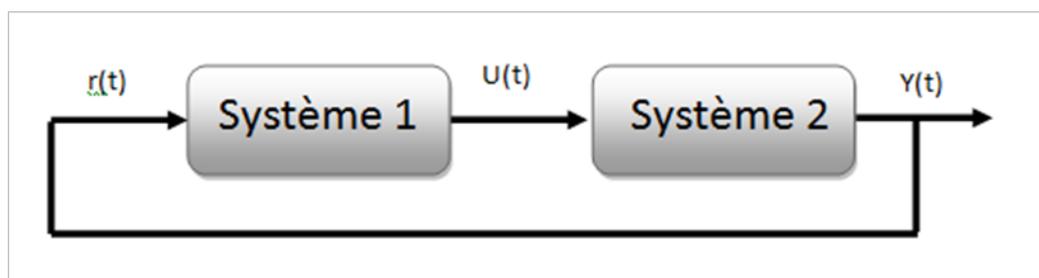


Figure III.3 : Boucle fermée

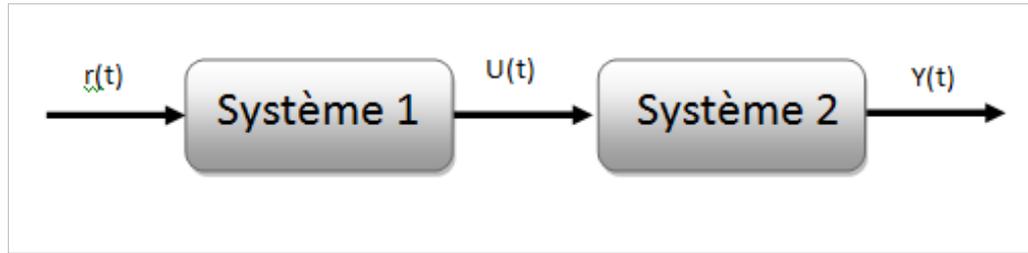


Figure III.4 : Boucle ouverte

### III.2.2.3 Linéarisation par retour d'état (Feedback linéarisation):

La linéarisation par retour d'état (Feedback Linéarisation) [30]. Un système non linéaire est dit sous la forme. Canonique si ses dynamiques sont représentées par:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{n}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{x} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

-  $\mathbf{u}$  la commande.

-  $\mathbf{x}$  la sortie.

-  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  et  $\mathbf{b}(\mathbf{x})$  sont des fonctions non linéaires des états. L'équation (III.1) peut être écrite :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ f(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \end{pmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$\mathbf{b}(\mathbf{x}) \neq \mathbf{0}$  alors de l'équation (III.2) on peut choisir la loi de commande suivante :

$$\mathbf{U}^* = \frac{1}{\mathbf{b}(\mathbf{x})} (\mathbf{v} - \mathbf{f}(\mathbf{x})) \quad (\text{III.3})$$

Avec  $\mathbf{v}$  étant une entrée équivalente à spécifier. Remplaçant par l'équation (III.3) dans l'équation (III.1), on obtient :

$$\mathbf{X}(\mathbf{n}) = \mathbf{v} \quad (\text{III.4})$$

La non linéarité et l'entrée et la sortie sont éliminées ensuite, choisissez la nouvelle commande  $\mathbf{V}$  comme il se doit

$$= -k_0 x - k_1 \dot{x} - \dots - k_{n-1} x^{n-1} \quad (\text{III.5})$$

Avec le gain choisis tels que les racines du polynôme  $p_n + k_{n-1}p_{n-1} + \dots + k_0 = 0$  sont à partie réelle négative menant à des dynamiques exponentiellement écuries

$$X^n + k_{n-1} x^{n-1} + \dots + k_0 x = 0 \quad (\text{III.6})$$

Cela signifie que  $x(t) \rightarrow 0$ . Pour les tâches impliquant la poursuite de la sortie désirée  $x(t) = d$ , alors la loi de commande peut être choisie de la même manière que précédemment

$$V = d_d^n - k_0 e - k_1 \dot{e} - \dots - k_{n-1} e^{n-1} \quad (\text{III.7})$$

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \quad (\text{III.8})$$

Représente l'erreur de poursuite, et donc le vecteur d'erreur est défini comme :

$$E = (e, \dot{e}, \dots, e^{n-1})^T$$

Remplaçant l'équation (III.7) dans l'équation (III.3), puis l'équation résultante dans l'équation (III.1) et utilisant l'équation (III.8), cela mène à des dynamiques en boucle fermée exponentiellement stables :

$$e^n + k_{n-1} e^{n-1} + \dots + k_0 e = 0 \quad (\text{III.9})$$

Ce qui implique que  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow 0$ , et qui est l'objectif principal de la commande

### III.2.3 Description du mode glissant:

#### III.2.3.1 Définition du mode glissant :

La technologie de position de glissement consiste à ramener les trajectoires de l'état du système à la surface de glissement en la changeant en utilisant la logique correcte appropriée pour basculer vers le point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [23].

#### III.2.3.2 La commande par mode glissant:

Dans toutes les conditions initiales, il maintient le point représentatif à la surface de la zone de phase en incorporant les éléments de commutation dans la loi d'attaque. Et le point représentatif du système. il atteint la surface excédentaire en un temps limité. Et bref, le

Système passe en mode dérapage à ce Le point a atteint la surface de glissement. Alors son comportement devient. Insensible aux influences extérieures [23] [30].

La surface de glissement est est donnée par :

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = \mathbf{c}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{c}_2 \mathbf{x}_2 + \dots + \mathbf{c}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{c}_n \quad (\text{III.10})$$

La condition d'existence d'une surface de glissement

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{S}_2 \quad (\text{III.11})$$

L'établissement de la loi de commande

$$\mathbf{U} = \mathbf{u}_{\text{eq}} + \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}) \quad (\text{III.12})$$

$\mathbf{U}_{\text{eq}}$  : la commande équivalente.

Sign (.) : La fonction signe.

$\mathbf{K}$  : une constant positive.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{x}_1 \end{array} \right. \quad (\text{III.13})$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{g} \sin x_1 - (\mathbf{m} \mathbf{l} (x_2)^2 \cos x_1 \sin x_1) / (\mathbf{m}_p + \mathbf{m}_c)}{\mathbf{l} (\frac{4}{3} - \mathbf{m}_p \cos^2 x_1 / (\mathbf{m}_p + \mathbf{m}_c))}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \frac{\cos x_1 / (\mathbf{m}_p + \mathbf{m}_c)}{\mathbf{l} (\frac{4}{3} - \mathbf{m}_p \cos^2 x_1 / (\mathbf{m}_p + \mathbf{m}_c))}$$

$\mathbf{U}(\mathbf{t})$  : la commande appliquée sur le chariot.

$\mathbf{X}$  : la position du chariot.

$\theta$  : L'angle du pendule (rad).

$\mathbf{M}_p$  : la masse du pendule (g).

$\mathbf{M}_c$  : la masse totale du chariot pendule (g).

$\mathbf{L}$  : demi-longueur du pendule (cm).

$\mathbf{G}$  : la pesanteur ( $\text{m/s}^2$ ).

### III.3 Représentations d'état d'un pendule inverse :

#### III.3.1 Dérivation des équations cinématiques complètes non linéaires pour le problème classique du pendule inverse. :

Nous dérivons les équations cinématiques non linéaires complètes pour le problème classique du pendule inverse. Bien que la formule de Lagrange soit plus élégante, cette utilise une méthode newtonienne plus simple que toute personne ayant une dynamique géométrique de deuxième niveau peut comprendre.

Le chariot pendulaire a deux coordonnées généralisées:

- $x$  pour décalage horizontal.
- faire tourner le pendule.

Le  $x$  positif est la direction vers la droite et l'angle est le sens des aiguilles d'une montre en radians [31].

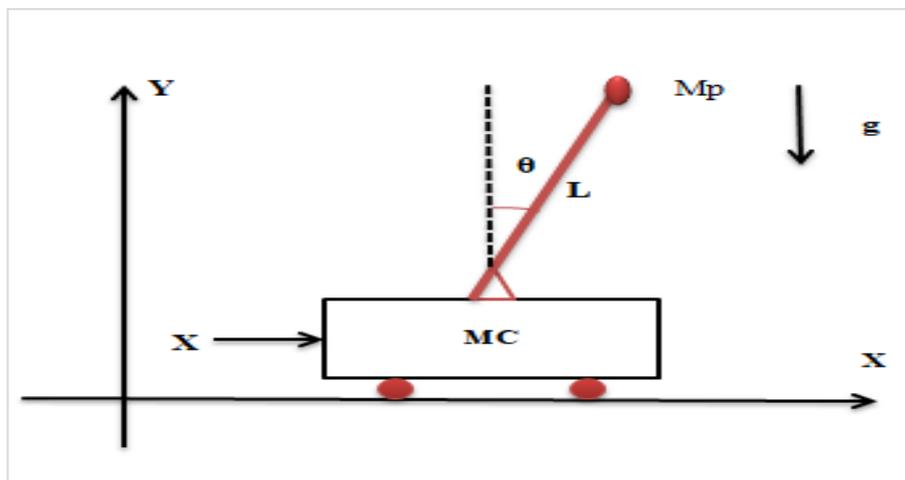


Figure III.5 : pendule inversé

#### Loi de newton 2 :

Le modèle dynamique du char et du pendule sont deux cinématiques souvent obtenus en appliquant un froc analyse utilisant des diagrammes de corps libres et la deuxième loi de Newton  $\mathbf{F}=\mathbf{ma}$  cependant, il existe d'autres méthodes disponible pour réaliser le modèle

dynamique du système par exemple , l'approche de LaGrange qui calcule la différence entre l'énergie cinétique totale  $T$  et l'énergie potentielle totale  $V$  du système [32] [31] [33]:

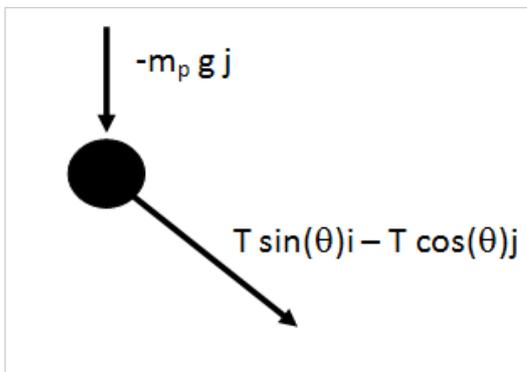
$$L=T+V \tag{III.14}$$

Carta :  $i=F-T \sin (\theta)=M_c \ddot{x}$  (III.15)

Pendule :  $i=T \sin (\theta)=m_p a_{px}$  (III.16)

$$J=-T \cos (\theta)-m_p g=m_p a_{pg} \tag{III.17}$$

FBO (PENDULE)



FBO (chariot)

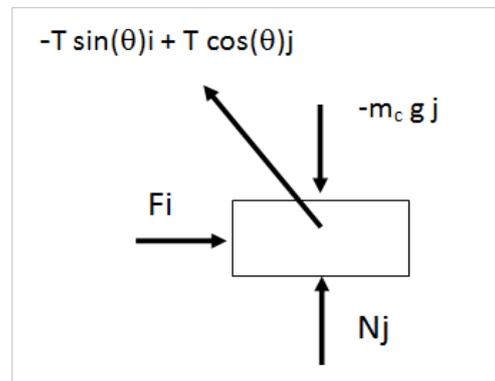


Figure III.6 : la force agissant sur pendule

Figure III.7: la fource agissant sur le chariot

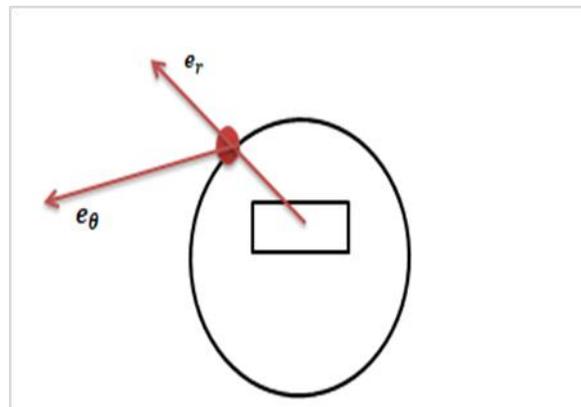


Figure III.8: L'orbite circulaire du Bundle est sous l'influence de la force

$$\mathbf{a}_p = \mathbf{a}_c + \mathbf{a}_{p/c}$$

$$= \ddot{x} \mathbf{i} + [L \ddot{\theta} \mathbf{e}_\theta - L \dot{\theta}^2 \mathbf{e}_r]$$

$$= \ddot{x} + L \ddot{\theta} [-\cos (\theta) \mathbf{i} -\sin (\theta) \mathbf{j}] -L \dot{\theta}^2 [-\sin (\theta) \mathbf{i} +\cos (\theta) \mathbf{j}] \tag{III.00}$$

L'équation (III.16) et (III.17) :

$$(III.16) \rightarrow T \sin(\theta) = m_p \ddot{x} - m_p L \ddot{\theta} \cos(\theta) + m_p L \dot{\theta}^2 \sin(\theta) \quad (III.18)$$

$$(III.17) \rightarrow -T \cos(\theta) - m_p g = -m_p L \ddot{\theta} \sin(\theta) - m_p L \dot{\theta}^2 \cos(\theta) \quad (III.19)$$

L'équation ((III.18)\*cos(θ)+(III.19)\*sin(θ)

$$\rightarrow -m_p g \sin(\theta) = m_p \ddot{x} \cos(\theta) - m_p L \ddot{\theta} \quad (III.20)$$

$$F + m_p L \ddot{\theta} \cos(\theta) - m_p L \dot{\theta}^2 \sin(\theta) = (m_p + m_c) \ddot{x} \quad (III.21)$$

Dérivation des équations de mouvement pour le pendule inversé monté sur un chariot en utilisant la méthode des équations de Lagrange. Système à deux degrés de liberté [33].

### III.3.2 Modèle simplifié du pendule inverse :

Le système de pendule inversé est un système mécanique distinct Avec deux coordonnées, ( $\mathbf{x}$ ) la position sur le chariot sur ses rails et  $\theta$  est la position angulaire de la barre et une force de commande  $\tau$  La masse du pendule est concentrée à l'extrémité du bâton [34]

### III.3.3 Coordonnées du centre de gravité avec l'axe cartésien :

$$X_m = x - l \sin(\theta) \quad (III.22)$$

$$Y_m = l \cos(\theta) \quad (III.23)$$

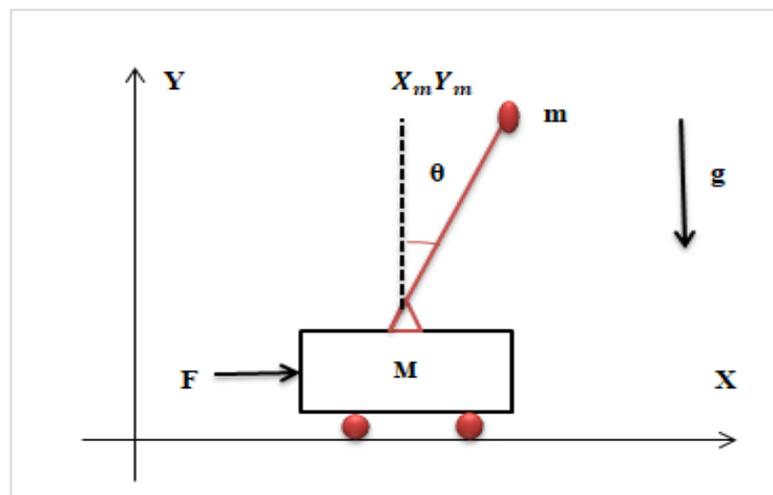


Figure III.9 : pendule inversé

III.3.4 L'énergie mécanique potentielle est donnée par :

$$\dot{x}_m = \dot{x} - l \dot{\theta} \cos(\theta) \quad (\text{III.24})$$

$$\dot{y}_m = -l \dot{\theta} \sin(\theta) \quad (\text{III.25})$$

L'énergie potentielle totale du système. En utilisant le bas de la position du reste du pendule peut être écrite comme un point de référence vertical sur une figure

$$V = m g y_m - m g l \cos(\theta) \quad (\text{III.26})$$

Où  $g$  est la constante de gravitation

III. 3.5 L'énergie mécanique cinétique est donnée par :

$$\begin{aligned} T &= 1/2 M \dot{x}^2 + 1/2 m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) \\ &= 1/2 M \dot{x}^2 + 1/2 m [\dot{x}^2 - 2 l \dot{\theta} \dot{x} \cos(\theta) + l^2 \dot{\theta}^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)] \\ T &= 1/2 (M+m) \dot{x}^2 + 1/2 m l^2 \dot{\theta}^2 - m l \dot{\theta} \dot{x} \cos(\theta) \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

On utilise les équations (III.26) et (III.27), on déduit le lagrangien suivant ((III.14)) :

$$L = T + V$$

$$L = 1/2 (M+m) \dot{x}^2 + 1/2 m l^2 \dot{\theta}^2 - m l \dot{\theta} \dot{x} \cos(\theta) - m g l \cos(\theta) \quad (\text{III.28})$$

Les équations différentielles décrivant la dynamique d'un système mécanique sont obtenues par application de l'équation d'Euler-Lagrange donnée par :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{dq} \right) - \frac{dL}{dq} = F(t) U \quad (\text{III.29})$$

Nous dérivons ( $L$ ) en termes de ( $X$ )

$$(M+m) \ddot{x} - m l \ddot{\theta} \cos \theta + m l \dot{\theta}^2 \sin \theta = F(t) \quad (\text{III.30})$$

Nous dérivons ( $L$ ) en termes de ( $\theta$ )

$$m l^2 \ddot{\theta} - m l \ddot{x} \cos \theta + m l \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta - m l \dot{\theta} \dot{x} \sin \theta - m g l \sin \theta = 0$$

$$ml^2\ddot{\theta} - ml\ddot{x}\cos\theta - mg\,l\sin\theta = 0 \quad (III.31)$$

En utilisant la matrice d'inertie, les équations d'Euler -Lagrange (III.30) et (III.31) peuvent reformuler dans la forme vectorielle l'équation (III.30) avec la matrice des effets centrifuge et de Coriolis  $C$  suivante :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -ml\dot{\theta}\sin\theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

le vecteur de pesanteur  $g$  donné par :

$$g = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

et le vecteur d'entrée exprimé comme suit :

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (III.34)$$

où la matrice d'inertie est donnée par :

$$A = \begin{bmatrix} \sin x_1 & mlx_2^2 \dot{\cos} x_1 \\ mlx_2^2 \dot{\cos} x_1 & g \end{bmatrix} \quad (III.35)$$

Rappelons que la matrice d'inertie est symétrique et définie positive, donc inversible. En se basant sur la forme vectorielle et l'inversion de la matrice d'inertie, on a:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{g \sin x_1 - (ml(x_2)^2 \cos x_1 \sin x_1) / (m_p + m_c)}{l(\frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c))} \\ \frac{\cos x_1 / (m_p + m_c)}{l(\frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c))} \end{bmatrix} \quad (III.36)$$

Qui satisfait automatiquement la deuxième loi de Newton. Notez que les deux équations de (III.36) ont toutes 2<sup>er</sup>d dérivés sur le côté gauche et ne sont pas encore sous la forme de modèle d'espace d'états standard. Une représentation d'espace du système peut être commandé [35].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (III.37)$$

Dans notre cas le déplacement selon l'axe des abscisses ( $a$ ) n'est pas considéré parce que le pendule est fixe, alors  $x_2$  et  $x_3$  sont nulles. En conséquence, nous obtenons le modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (III.38)$$

$$F(x) = \frac{g \sin x_1 - (m l (x_2)^2 \cos x_1 \sin x_1) / (m_p + m_c)}{l (\frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c))} \quad (III.39)$$

$$G(x) = \frac{\cos x_1 / (m_p + m_c)}{l (\frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c))} \quad (III.40)$$

Avec :

- $x_1$  : est la position angulaire du pendule.
- $x_2$  : sa vitesse angulaire.

**III.4 Strict feedback système:**

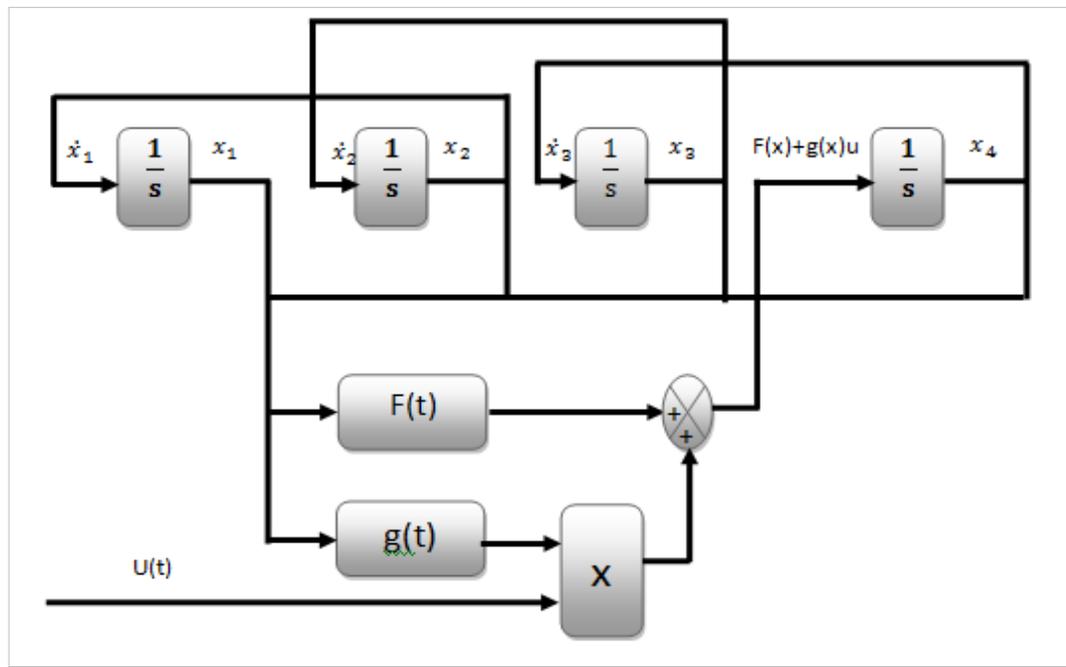


Figure III.10: Strict feedback système

### III.5 Résultats de simulation :

Considérons le système mono-entrée mono-sortie décrit par les équations différentielles suivantes. L'objectif de la commande consiste à synthétiser une loi de commande assurant la bornitude de tous les signaux du système bouclé et la poursuite pour la sortie  $\mathbf{y}(t)$  d'une trajectoire de référence  $\mathbf{y}_d(t)$ . modèle dynamique est donné par.

Notons que les fonctions non linéaires  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  et  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  sont supposées connues. Les valeurs suivantes sont utilisées :  $\mathbf{g}=9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $\mathbf{m}_c = 1\text{kg}$ ,  $\mathbf{m}_p = 0.1\text{kg}$ ,  $\mathbf{L}=0.5\text{m}$ . Notre objectif est de forcer la sortie du système à suivre la trajectoire :  $\mathbf{Y}_d(t)=\sin(t)$ . L'amplitude de la sinusoïde de référence est de 0,1 seulement [36] [37].

L'erreur de trace est donnée par

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}(t) \quad (\text{III.41})$$

Et une erreur filtrée par

$$\mathbf{S}(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \mathbf{e}(t) \quad , \lambda > 0 \quad (\text{III.42})$$

A partir de l'équation (III.42), on déduit que pour  $\mathbf{S}(t) = \mathbf{0}$ , nous avons une équation différentielle linéaire dont la solution implique la convergence vers zéro de  $\mathbf{e}(t)$  et de ses dérivées jusqu'à l'ordre  $n-1$ . De plus, la bornitude du signal  $\mathbf{s}(t)$  par une constante  $\sigma$ , entraîne la bornitude de l'erreur  $\mathbf{e}(t)$  et de ses dérivées par [38]:

La dérivée de l'équation (III.42) peut être écrite sous la forme.

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{v} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (\text{III.43})$$

Avec 
$$\mathbf{v} = \mathbf{y}_d^n + \alpha_{n-1} \mathbf{e}^{(n-1)} + \dots + \alpha_1 \dot{\mathbf{e}} \quad (\text{III.44})$$

Ou 
$$\alpha_j = \frac{(n-1)!}{(n-1)!(j-1)!} \lambda^{n-j} \quad \mathbf{j}=1, \dots, n-1$$

Depuis l'ordre  $n=2 \Rightarrow \mathbf{v}=\mathbf{y}_d^n$  et  $\alpha = \lambda$

Si les fonctions  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  et  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  sont connues, pour atteindre les objectifs de commande, la loi de commande suivante est une solution :

$$\mathbf{U} = \frac{1}{\mathbf{g}(\mathbf{x})} ( - \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} + \mathbf{k}\mathbf{s} ) \quad (\text{III.45})$$

Avec K une constant positive.

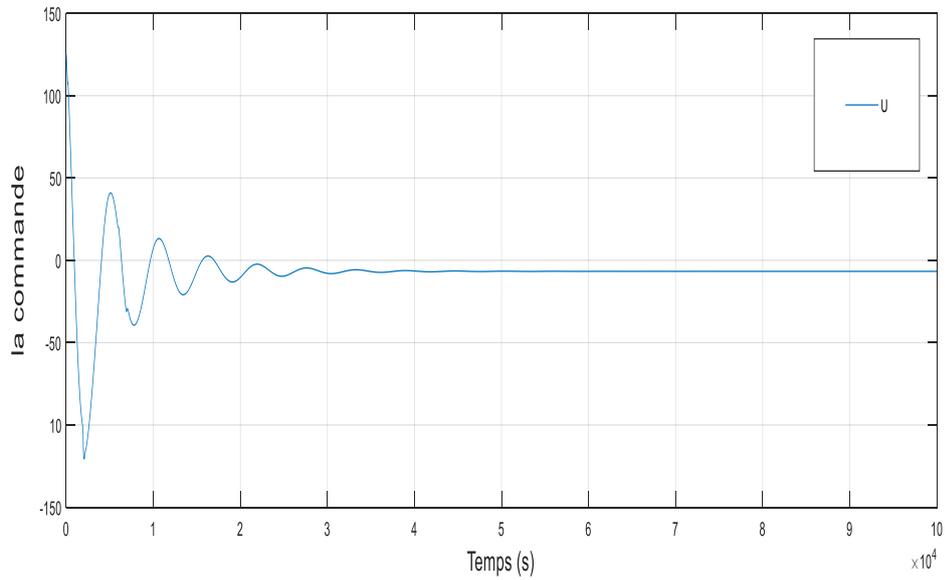
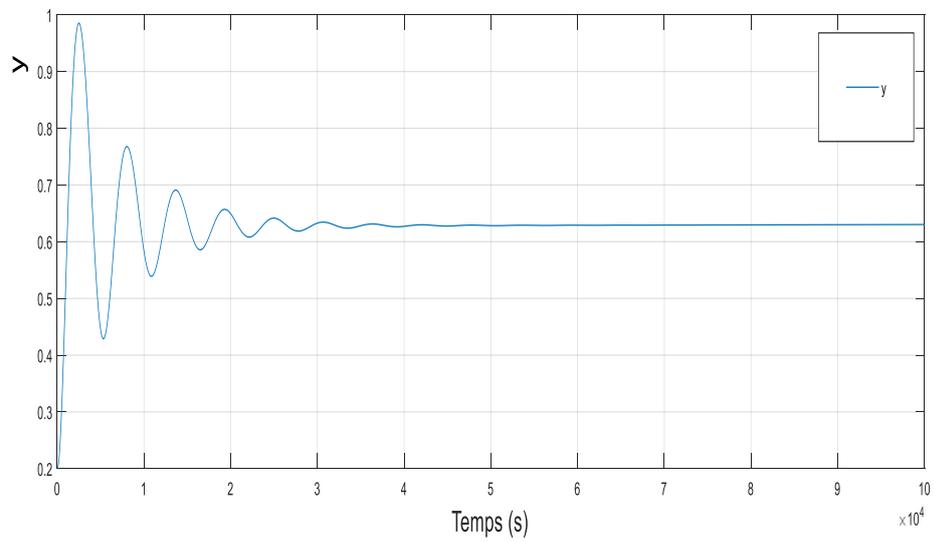
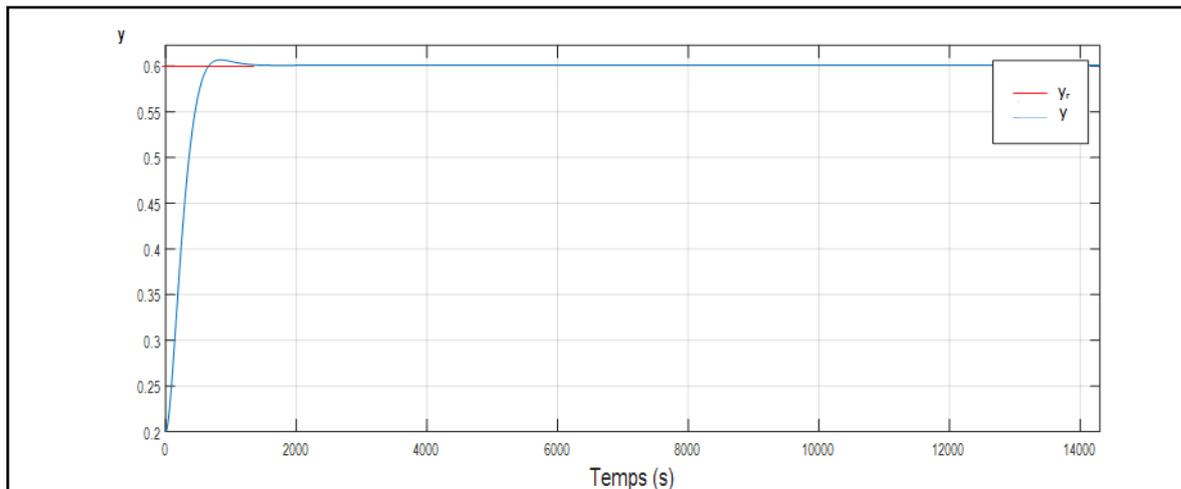


Figure III.11: Courbe Signal sortie (Y)





**Figure III.12 :** Courbe de commande U

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons supposé que  $f$  et  $g$  sont deux choses qui sont connues. Et support, feedback, description de la position de glissement, représentations d'état du pendule inversé utilisant la loi de Newton, extraction des coordonnées centrales du poids avec l'axe cartésien, énergie de potentiel mécanique avec la dérivation des équations de Lagrange du pendule au système. Équations au pendule linéaire avec contrôle complet du pendule inversé à l'aide de Matlab.

**CHAPITRE IV**  
**COMMANDE SANS**  
**MODELE**  
**ADAPTATIVE FLOUE**  
**(CSMAF)**

# Chapitre IV

---

## Commande sans modèle adaptative floue (CSMAF)

---

### IV.1 Introduction :

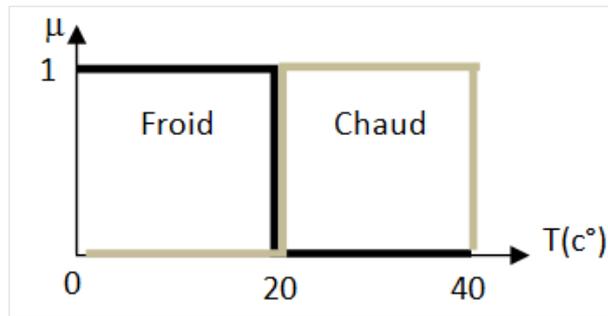
Dans le chapitre précédent on a supposé que les deux fonctions  $f(x)$  et  $g(x)$  sont connus, alors qu'en pratique ça arrive parfois que la modélisation de système n'est pas possible ou bien la modélisation n'est pas parfaite. Donc, dans ce cas-là ces fonctions sont en conséquence mal connues ou bien inconnues totalement. Pour cette raison, on suppose dans cette partie du mémoire que ces fonctions sont totalement inconnues est on cherche à trouver une loi de commande qui assure l'objectif de commande. Avant d'entamer la synthèse de la loi de commande, nous présentons quelques préliminaires nécessaires.

### IV.2 Logique floue:

Dans cette partie, nous exposons un bref rappel sur la théorie des ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue, en insistant sur les idées utilisées en commande floue. Ensuite, nous présentons la structure des systèmes flous et en particulier les systèmes flous de *Tak agi-Sugeno* [39].

### IV.3 Logique classique et logique floue:

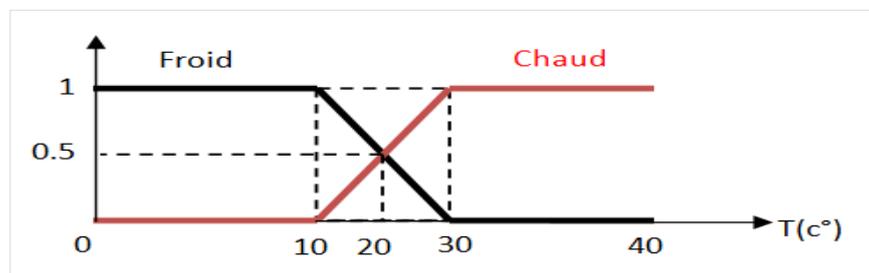
La logique classique ne peut traiter que deux états: vrai ou faux, froid ou chaud. Incapable de représenter correctement ces formules linguistiques, C'est là qu'intervient la logique floue [10].



**Figure IV.1:** Classification selon la logique classique

D'après cette représentation, toute valeur de température inférieure à 20°C est considérée comme froide, et s'elle qui est supérieure à cette valeur est considérée chaude. Cependant, une telle logique de classification n'est même pas une logique. D'abord pourquoi la valeur 19,9°C doit être considérée froide, tandis que la valeur 20,1°C est chaude? Alors que

en réalité que ces deux valeurs sont presque les mêmes. La logique floue envisage le problème d'une autre façon [10].



**Figure IV.2:** Classification selon la logique floue

#### **IV.4 Principe de la commande floue:**

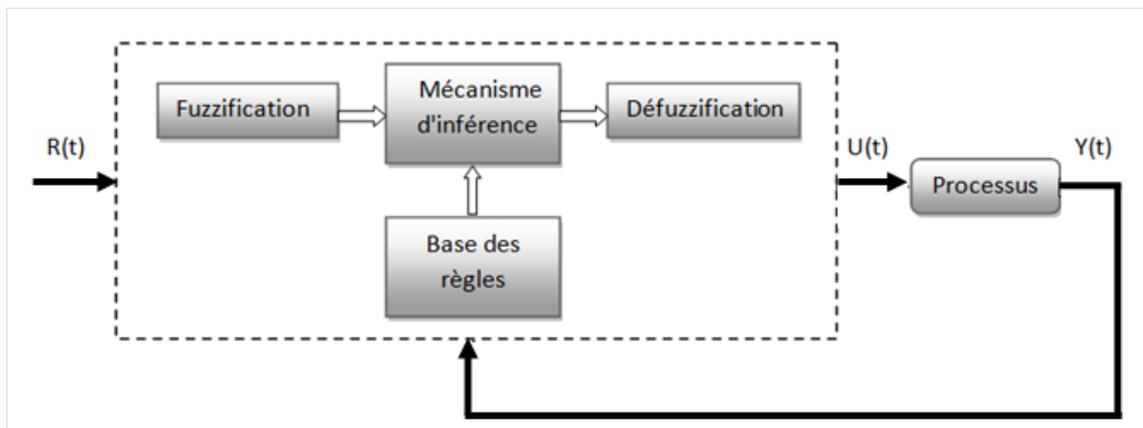
Lorsqu'un opérateur humain commande manuellement un système, les actions qu'il réalise sont dictées par une connaissance subjective du fonctionnement de ce système. Par exemple, si l'eau est chaude dans une piscine, on la refroidit, si elle est très chaude on la refroidit plus. Cette commande du système peut être envisagée de façon différente selon la personne qui la réalise. Ce principe est la base de la commande floue. La mesure «température» réalisée sur le système est prise en compte par l'intermédiaire d'une variable linguistique («froid», «tiède», «chaud»), qui est issue de l'analyse d'un expert humain. Ensuite, l'action à réaliser est déduite à la fois d'un ensemble de règle de commande («s'il fait froid, on chauffe plus...») et de l'état du système, qualifiée par la variable linguistique [10].

### **IV.5 Commande floue :**

Une commande floue peut être vue comme un système expert fonctionnant à partir d'une représentation des connaissances basées sur la théorie des ensembles flous. Nous allons rappeler dans ce qui suit une description sommaire de chaque module composant ce commande [40].

### **IV.6 Structure d'une commande floue:**

La commande floue Le commande flou comporte essentiellement quatre parties; un bloc de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et un bloc de défuzzification. La structure générale d'une commande floue est montrée sur la figure suivante [10]:



**Figure IV.3:** Structure générale d'une commande floue

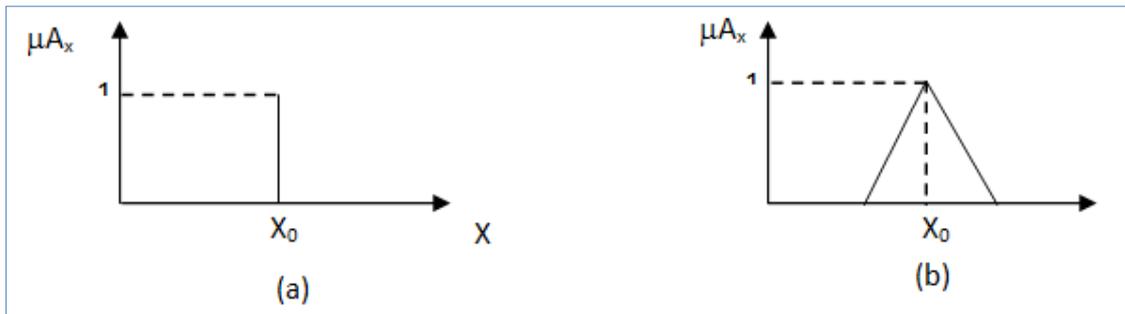
R(t) : le signal de référence

U(t) : le signal de commande

Y(t) : la sortie du système à commander

**IV.6.1 Bloc de fuzzification:**

La fuzzification consiste à relier le point numérique  $x_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}]^T$  de  $U$  à l'ensemble flou  $A_x = [A_{x1}, A_{x2}, \dots, A_{xn}]^T$  dans  $U = U_1 * U_2 * \dots * U_n$  ou  $A_{xi}$  est un ensemble flou dans  $U_i$ . Il existe deux méthodes de fuzzification suivant la définition un singleton flou (a). Un ensemble flou (b) [40].



**Figure IV.4 :** Méthodes de fuzzification ; (a) singleton, (b) ensemble flou

Il sert à transformer les variables numériques non floues provenant des entrées en variables linguistiques floues. La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrées et de sortie. Transforme la grandeur physique d'entrée en une grandeur floue. On l'utilise pour pouvoir activer les règles qui sont exprimées à l'aide de variables linguistiques associées à des ensembles flous. Dans la littérature de la commande floue, deux approches de fuzzification sont généralement utilisées, à savoir : la fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton [10] [39].

**IV.6.2 le mécanisme d'inférence :**

Effectue une relation entre les fonctions d'appartenances des entrées et les fonctions d'appartenances de sorties [10]. Le mécanisme d'inférence floue utilise la base des règles floues pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers les ensembles flous dans l'espace de sortie en se basant sur les opérations de la logique floue. L'antécédent de la règle  $R_i$ , définit un produit cartésien de  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$ , et la règle elle-même  $R_i$ , est vue comme une implication. Soit  $A_x$  un ensemble flou dans  $U$ , alors chaque règle  $R_i$  détermine un ensemble flou  $B_i = A_x \circ R_i$ , dans  $V$  [40].

Le bloc d'inférence est le cœur d'un régulateur flou, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue. Une représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou table des règles, permet de synthétiser le cœur de régulateur flou. Le tableau (Figure IV.4) représente une table d'inférence avec cinq sous-ensembles flous pour deux variables d'entrée à savoir: l'erreur 'e' et sa dérivée 'de', et une variable de sortie: la commande 'du' [10].

		Du		E				
		NG	NP	EZ	PP	PG		
De	NG	NG	NG	NP	NP	EZ		
	NP	NG	NP	NP	EZ	PP		
	EZ	NP	NP	EZ	PP	PP		
	PP	NP	EZ	PP	PP	PG		
	PG	EZ	PP	PP	PG	PG		

**Figure IV.5:** Table d'inférence avec cinq sous-ensembles flous

#### **IV.6.2.1 Méthode de Mamdani :**

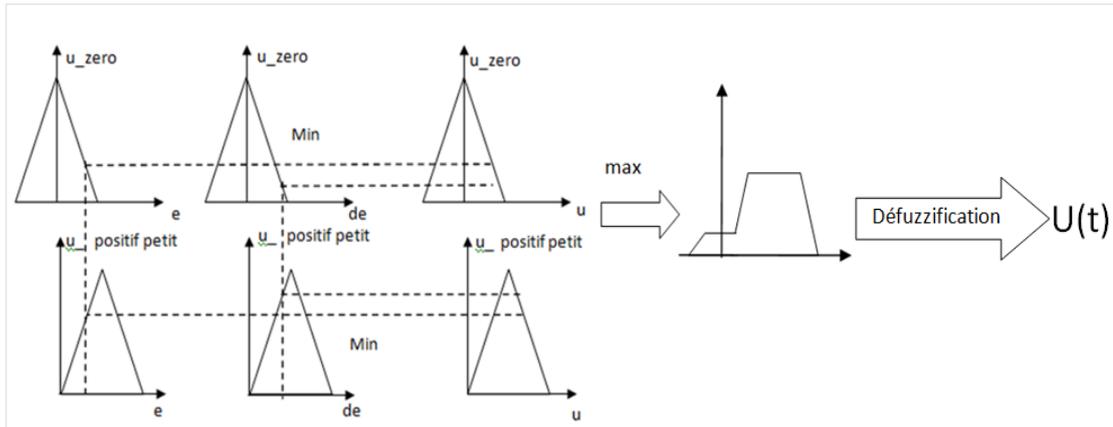
Dans le modèle de Mamdani, les prémisses et les conclusions des règles sont symboliques ou linguistiques. Cette méthode se base sur l'utilisation de l'opérateur *mim* pour l'implication floue et l'opérateur *max* pour l'agrégation des règles. La sortie nécessite l'utilisation d'une méthode de défuzzification qui est généralement le barycentre. Une autre variante du modèle de Mamdani consiste à remplacer l'opérateur *mim* de l'implication floue par le produit algébrique [40].

#### **IV.6.2.2 Méthode de SUGENO:**

L'opérateur ET est réalisé par la formulation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomial [10].

#### **IV.6.2.3 Méthode de Tsukumoto :**

Dans ce cas, des fonctions mono toniques sont associées aux variables de sortie. La sortie totale est une moyenne pondérée des degrés de confiance des règles floues et des valeurs des fonctions des variables de sortie [40].



**Figure IV.6 :** Les différents modèles d'inférence floue

**IV.6.3 Base des règles :**

Fournie par l'expert et les sous-ensembles flous des entrées et de sorties correspondants à la fuzzification [10]. Une base de règles floues  $R$  est une collection de règles floues de la forme *Si - Alors*,  $R = [R_1 R_2 \dots R_m]$ . Une règle floue  $R_1$  est donnée sous le modèle de *Mamdani* comme suit:

$$R_i: \text{SI } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } A_{i2} \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ et } A_{in} \text{ Alors } Y \text{ est } B_i$$

Ou sous le modèle de «*Takagi-Sugeno (TS)*» sous la forme:

$$R_i: \text{SI } x_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } A_{i2} \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ est } A_{in} \text{ Alors } Y \text{ est } f(x)$$

Avec  $(x_1)$  généralement un polynôme. Si le polynôme est d'ordre zéro on dit que le modèle est de *TS* d'ordre zéro, et si le polynôme est du premier ordre, on dit que le modèle [40].

**IV.6.4 Bloc de Défuzzification:**

La défuzzification transforme la grandeur floue issue de l'inférence en une grandeur physique. Cependant, il n'existe pas une procédure systématique pour choisir la stratégie de défuzzification. Un critère de choix des méthodes de défuzzification en commande floue est la simplicité des calculs. Ce critère a conduit à l'utilisation, le plus souvent [39].

Le résultat de l'agrégation est généralement un ensemble flou. Or, si l'on désire une sortie non floue, il faut transformer cette partie floue issue de l'inférence en une valeur

Physique. Cette opération est appelée défuzzification. Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus répandues sont :

- La méthode du centre de gravité.
- La méthode du maximum.
- La méthode de la hauteur.
- La méthode de l'aire.

#### **IV.7 Position du problème :**

Nous considérons le modèle d'état suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_{i+1} \quad , i = 1, \dots, n - 1 \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \\ y = x_1 \end{array} \right. \quad (IV.1)$$

Ou, encore

$$Y^{(n)} = f(x) + g(x) u \quad (IV.2)$$

où  $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{n-1}]^T$  est Le vecteur d'état,  $u$  et  $y$  sont les entrées et sorties de commande du système pour les fonctions non linéaires continues inconnues.

L'objectif de la commande consiste à synthétiser une loi de commande assurant la borngnitude de tous les signaux du système bouclé et la poursuite d'une trajectoire de référence  $y_d(t)$  tout en considérant que les deux fonctions  $f(x)$  et  $g(x)$  sont inconnues.

#### **IV.8 Conception d'une commande par modes glissants adaptative floue :**

Pour définir la loi de commande qui force le système à suivre le chemin requis avec tous les signaux associés dans le système en boucle fermée. nous posons  $Y = [y, \dot{y}, \dots, y^{n-1}]^T$  et  $Y_r = [y_r, \dot{y}_r, \dots, y_r^{n-1}]^T$  ou  $y_r$  dénote la trajectoire de référence.

**Hypothèse 1 :** Le terme  $d(u)$  est représenté par diverses valeurs de  $\alpha$  Le terme  $d(u)$  diffère et est approximativement égal à  $d(u) = \text{sgn}(\dot{u}) \frac{B-c}{\alpha}$  Ainsi, nous pouvons considérer  $d(u)$  comme une constante. En d'autres termes [41]:

$$d(u) = -\text{sgn}(\dot{u}) d \quad (IV.3)$$

ou  $d > 0$ .

**Hypothèse 2 :** Pour  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}$  nous supposons l'existence des fonctions inconnues  $\mathbf{g}_1(\mathbf{x})$  et  $\mathbf{g}_2(\mathbf{x})$  tel que :

$$\mathbf{0} < \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) < \mathbf{g}(\mathbf{x}) < \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) \quad \text{for all } \mathbf{x} \in \mathbf{R}$$

**Hypothèse 3 :** La trajectoire désirée et ses dérivées jusqu'à l'ordre  $n$  sont connues, continues et bornées.

Nous définissons l'erreur de poursuite de la sortie  $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_r$  et le vecteur d'erreur comme étant :

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_r \\ &= [\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}, \dots, \mathbf{e}^{(n-1)}]^T \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

La surface de glissement est définie par :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(\mathbf{E}) &= \mathbf{c}_1 \mathbf{e} + \mathbf{c}_2 \dot{\mathbf{e}} + \dots + \mathbf{c}_{n-1} \mathbf{e}^{(n-1)} \\ &= \mathbf{C}^T \mathbf{E} \end{aligned} \quad (\text{IV.5})$$

où  $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_{n-1}, \mathbf{1}]^T \in \mathbf{R}$  sont les coefficients du polynôme de *Hurwitz*

$\mathbf{p}^n + \mathbf{c}_1 \mathbf{p}^{n-1} + \mathbf{c}_2 \mathbf{p}^{n-2} + \dots + \mathbf{c}_{n-1}$  où  $\mathbf{p}$  est une variable complexe. Pour  $\mathbf{e}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ , le problème de poursuite est de forcer le vecteur d'erreur à rester sur la surface de glissement  $\mathbf{S}(\mathbf{E}) = \mathbf{0}$  pour  $\mathbf{t} \geq \mathbf{0}$ . Une condition suffisante est de choisir la loi de commande telle que [41].

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\mathbf{S}^2(\mathbf{E})) \leq -\eta |\mathbf{S}| \quad \eta > 0 \quad (\text{IV.6})$$

L'équation (IV.1), on obtient:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}^{(x)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{C} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} - \text{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \mathbf{d} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{x} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

De L'équation (IV.5), on a:

$$\dot{\mathbf{S}} = \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{c}_i \mathbf{e}^{(i)} + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{C} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} - \text{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \mathbf{d} \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_r^n \quad (\text{IV.8})$$

Si  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  et  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  sont connus, le commande de la position de glissement se ferait par théorie.

**Théorème 1**

Si les hypothèses 1 et 2 sont vérifiées, et si on choisit la loi de commande suivante :

$$\mathbf{U}^* = \frac{1}{c g(x)} [ \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - \mathbf{f}(x) + \mathbf{y}_r^n - \eta \operatorname{sgn}(S) ] + \operatorname{sgn}(\dot{u}^*) \frac{d}{c} \quad (\text{IV.9})$$

Alors tous les signaux du système l'équation (IV.1) en boucle fermée sont bornés et l'erreur de poursuite converge vers zéro [41].

**Preuve 1**

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{S}^2 \quad (\text{IV.10})$$

En dérivant l'équation (IV.10), on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{S} \dot{\mathbf{S}} \\ &= \mathbf{S} [ \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + \mathbf{f}(x) + \mathbf{C} g(x) \mathbf{u} - \operatorname{sgn}(\dot{u}) d g(x) - \mathbf{y}_r^n ] \end{aligned} \quad (\text{IV.11})$$

En utilisant l'équation (IV.9), (IV.11) devient :

$$\dot{\mathbf{v}} = - \eta \operatorname{sgn}(S) S \leq - \eta S \quad (\text{IV.12})$$

La loi (IV.9) garantissant la stabilité de l'équation (IV.1), il n'est pas possible, difficile et impossible de mettre en œuvre cette commande, car elle suppose que les fonctions  $\mathbf{f}(x)$  et  $\mathbf{g}(x)$  sont inconnus. Nous allons donc traiter ces fonctions avec des systèmes flous et concevoir un nouveau code de commande de mode de glissement flou adaptatif pour cette classe de systèmes non linéaires. Nous utilisons une commande intégrée (PI) comme suit :

$$\mathbf{U}_p = \mathbf{k}_p \mathbf{S} + \mathbf{k}_i \int \mathbf{S} \quad (\text{IV.13})$$

Où :

- $\mathbf{S}$  : la surface de glissement
- $\mathbf{K}_p, \mathbf{k}_i$  : les gains du commande

La forme l'équation (IV.13) peut s'écrire comme suit :

$$\hat{p}(S|\theta_p) = \theta_p^T \psi(S) \quad (IV.14)$$

$\theta_p = [k_p, k_i]^T \in \mathbb{R}^2$  est le vecteur des paramètres. Nous utilisons aussi un système flou pour estimer  $\theta_p$  et obtenir une version adaptative du commande PI. Selon une propriété des systèmes flous, les deux fonctions  $f(x)$  et  $g(x)$  peuvent être approchées par les systèmes flous suivants [41]:

$$\hat{f}(x, \theta_f) = \theta_f^T \xi(x) \quad (IV.15)$$

$$\hat{g}(x, \theta_g) = \theta_g^T \xi(x) \quad (IV.16)$$

$$\hat{p}(x, \theta_p) = \theta_p^T \psi(x) \quad (IV.17)$$

Il donne l'erreur minimale approximative comme suit:

$$\varepsilon = (f(x) - \xi^T(x) \theta_f^*) + (g(x) - \xi^T(x) \theta_g^*) (C u - \text{sgn}(\dot{u}) d) \quad (IV.18)$$

Où  $\theta_f^*, \theta_g^*$  sont les vecteurs des paramètres optimaux définis comme suit :

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} \sup_{x \in \Omega_x} |\hat{f}(x, \theta_f) - f(x)| \quad (IV.19)$$

$$\theta_g^* = \arg \min_{\theta_g \in \Omega_g} \sup_{x \in \Omega_x} |\hat{g}(x, \theta_g) - g(x)| \quad (IV.20)$$

Où :  $\Omega_f, \Omega_g$  sont respectivement les espaces de contraintes de  $\theta_f$  et  $\theta_g$ . Il est important de noter que les vecteurs des paramètres optimaux  $\theta_f^*$  et  $\theta_g^*$  sont des quantités constantes artificielles introduites seulement pour un but d'analyse et ses valeurs ne sont pas exigées en mettant en application le commande. Pour ces vecteurs optimaux, nous avons besoin de l'hypothèse suivante [41].

**Hypothèse 4** : Les vecteurs des paramètres optimaux satisfont :

$$\Omega_f = \{\theta_f \in \mathbb{R}, |\theta_f| \leq M_f\} \quad (IV.21)$$

$$\Omega_g = \{\theta_g \in \mathbb{R}, 0 < |\theta_g| \leq M_g\} \quad (IV.22)$$

$$\Omega_p = \{\theta_p \in \mathbb{R}, 0 < |\theta_p| \leq M_p\} \quad (IV.23)$$

Où :  $\mathbf{M}_f, \mathbf{M}_g, \mathbf{M}_p$  sont des constantes positives inconnues. Finalement, la nouvelle loi de commande est introduite à travers le théorème suivant [42].

**Théorème 2**

Si les hypothèse (1 3) sont satisfaites et si nous choisissons la loi de commande suivante:

$$\mathbf{U} = \frac{1}{c\hat{g}(\mathbf{x}, \hat{e}_g)} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{C}_i \mathbf{e}^{(i)} - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{X}, \hat{e}_f) + \mathbf{y}_r^{(n)} - \hat{\mathbf{P}}(\mathbf{S}, \hat{e}_p) \right] + \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \frac{d}{c} \quad (\text{IV.24})$$

Et les lois d'adaptation données par :

$$\dot{\hat{e}}_f = \tilde{a}_1 \mathbf{S} \hat{\mathbf{x}} \quad (\text{IV.25})$$

$$\dot{\hat{e}}_g = \tilde{a}_2 \mathbf{S} \hat{\mathbf{x}} (\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \mathbf{d}) \quad (\text{IV.26})$$

$$\dot{\hat{e}}_p = \tilde{a}_3 \mathbf{S} \boldsymbol{\vartheta}(\mathbf{S}) \quad (\text{IV.27})$$

Avec  $\gamma_1, \gamma_2$  et  $\gamma_3$  des paramètres de synthèse positifs. Alors tous les signaux du système (IV.1) en boucle fermée sont bornés et l'erreur de poursuite converge vers zéro.

**Preuve 2**

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$\mathbf{v} = \frac{1}{2} \left[ \mathbf{S}^2 + \frac{1}{\tilde{a}_1} \tilde{\mathbf{e}}_f^T \tilde{\mathbf{e}}_f + \frac{1}{\tilde{a}_2} \tilde{\mathbf{e}}_g^T \tilde{\mathbf{e}}_g + \frac{1}{\tilde{a}_3} \tilde{\mathbf{e}}_p^T \tilde{\mathbf{e}}_p \right] \quad (\text{IV.28})$$

Où :

$$\tilde{\mathbf{e}}_f = \hat{e}_f^* - \hat{e}_f$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_g = \hat{e}_g^* - \hat{e}_g$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_p = \hat{e}_p^* - \hat{e}_p$$

En dérivant  $\mathbf{V}$ , on obtient :

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{S}\dot{\mathbf{S}} - \frac{1}{\tilde{a}_1} \tilde{\mathbf{e}}_f^T \dot{\hat{e}}_f + \frac{1}{\tilde{a}_2} \tilde{\mathbf{e}}_g^T \dot{\hat{e}}_g + \frac{1}{\tilde{a}_3} \tilde{\mathbf{e}}_p^T \dot{\hat{e}}_p \quad (\text{IV.29})$$

De l'équation (IV.8), nous avons :

$$\dot{\mathbf{S}} = \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{C}_i \mathbf{e}^{(i)} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \mathbf{d}\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}_r^{(n)} \quad (\text{IV.30})$$

En utilisant l'équation (IV.24), (IV.30) devient :

$$\dot{\mathbf{S}} = \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{C}_i \mathbf{e}^{(i)} - \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{C}\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}}) \mathbf{d}\mathbf{g}(\mathbf{x}) - [\mathbf{C}\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{X}, \hat{e}_g) - \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{C}_i \mathbf{e}^{(i)} - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{X}, \hat{e}_f) + \hat{\mathbf{P}}(\mathbf{S}, \hat{e}_p) - \mathbf{sgn}(\mathbf{u})\mathbf{d}\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}, \hat{e}_g)]$$

$$\begin{aligned}
 &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{X}, \hat{e}_f) + \left( \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}, \hat{e}_g^*) - \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}, \hat{e}_g) \right) (\mathbf{c}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d}) - \hat{\mathbf{P}}(\mathbf{S}, \hat{e}_p) \quad (\text{IV.31}) \\
 &= \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{X}, \hat{e}_f^*) + \left( \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \hat{e}_f^*) - \left( \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{x}, \hat{e}_g^*) \right) \right) (\mathbf{c}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d}) + \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{s}, \hat{e}_f^*) - \hat{\mathbf{P}}(\mathbf{S}, \hat{e}_p) - \\
 &\quad \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{s}, \hat{e}_f^*) + \hat{\mathbf{a}} \\
 &= \tilde{\mathbf{e}}_f^T \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{e}}_g^T \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) (\mathbf{c}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d}) + \tilde{\mathbf{e}}_p^T \vartheta(\mathbf{s}) - \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{s}, \hat{e}_f^*) + \hat{\mathbf{a}}
 \end{aligned}$$

Avec :

$$\hat{\mathbf{a}} = [\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \hat{e}_f^* \hat{\mathbf{i}}^T(\mathbf{X})] + [\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \hat{e}_g^* \hat{\mathbf{i}}^T(\mathbf{X})] (\mathbf{c}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d})$$

En utilisant l'équation (IV.31) dans l'équation (IV.29), on trouve :

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{S} \left[ \tilde{\mathbf{e}}_f^T \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) + \tilde{\mathbf{e}}_g^T \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) (\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d}) + \tilde{\mathbf{e}}_p^T \vartheta(\mathbf{s}) - \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{S}, \hat{e}_f^*) + \hat{\mathbf{a}} \right] - \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_1} \tilde{\mathbf{e}}_f^T \dot{e}_f - \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_2} \tilde{\mathbf{e}}_g^T \dot{e}_g \\
 &\quad - \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_3} \tilde{\mathbf{e}}_p^T \dot{e}_p \\
 &= \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_1} \tilde{\mathbf{e}}_f^T [\tilde{a}_1 \mathbf{S} \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) - \dot{e}_f] + \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_2} \tilde{\mathbf{e}}_f^T [\tilde{a}_2 \mathbf{S} \hat{\mathbf{i}}(\mathbf{x}) (\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{sgn}(\dot{\mathbf{u}})\mathbf{d})] - \frac{\mathbf{1}}{\tilde{a}_3} \tilde{\mathbf{e}}_p^T [\tilde{a}_3 \mathbf{S} \vartheta(\mathbf{S}) - \dot{e}_p] - \\
 &\quad \mathbf{S} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{S}, \hat{e}_f^*) + \mathbf{S} \hat{\mathbf{a}} \quad (\text{IV.32})
 \end{aligned}$$

Substituer l'équation (IV.25) (IV.27) dans l'équation (IV.32) mène à :

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{S} \hat{\mathbf{a}} - \mathbf{S} \hat{\mathbf{p}}(\mathbf{S}, \hat{e}_f^*) \leq \mathbf{S} \hat{\mathbf{a}} - \varsigma |\mathbf{S}| \leq \mathbf{0} \quad (\text{IV.33})$$

Comme  $\hat{\mathbf{a}}$  est l'erreur d'approximation minimale, (IV.33) est le meilleur résultat qu'on peut obtenir. Donc, tous les signaux dans le système sont bornés. Évidemment, si  $\mathbf{e}(\mathbf{0})$  est bornée alors  $\mathbf{e}(\mathbf{t})$  est aussi bornée pour tous  $\mathbf{t} \geq \mathbf{0}$ . Comme le signal de référence  $\mathbf{y}_r$  est borné alors le vecteur d'états  $\mathbf{x}$  est borné. Nous avons besoin de prouver que  $\mathbf{s} \rightarrow \mathbf{0}$  quand  $\mathbf{t} \rightarrow \infty$ . Assumons que  $|\mathbf{s}| \leq \eta \mathbf{s}$ , l'équation (IV.33) peut s'écrire comme suit [41] :

$$\dot{\mathbf{v}} = \leq |\mathbf{S}| |\hat{\mathbf{a}}| - \varsigma |\mathbf{S}| \leq \varsigma_s |\hat{\mathbf{a}}| - \varsigma |\mathbf{S}| \quad (\text{IV.34})$$

L'intégration de l'équation (IV.34) des deux côtés, mène à :

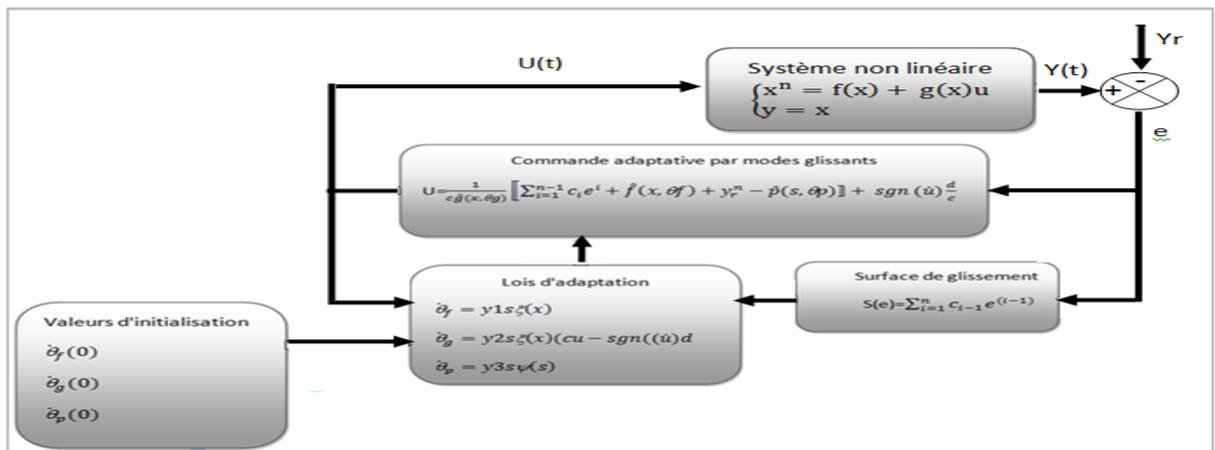
$$\int_0^t |\mathbf{S}| dt \leq \frac{1}{\varsigma} (|\mathbf{v}(\mathbf{0})| + |\mathbf{V}(\mathbf{0})|) + \frac{\varsigma_s}{\varsigma} \int_0^t |\hat{\mathbf{a}}| dt \quad (\text{IV.35})$$

Nous avons  $s \in L1$  et de l'équation (IV.33), nous savons que  $s$  est bornée et chaque terme dans l'équation (IV.31) est borné. Par conséquent,  $s, \dot{s} \in L\infty$ , en utilisant le lemme de Barbelât nous concluons que  $s \rightarrow 0$  quand  $t \rightarrow \infty$ . Le système est stable et l'erreur converge asymptotiquement vers zéro. Pour résumer, la Figure (IV.2) montre le schéma complet de la commande par modes glissants adaptative floue proposée. La procédure de conception de la commande adaptative floue par modes glissants est synthétisée comme suit :

1. Spécifier les valeurs initiales de  $k_p$  et  $k_i$ .
2. Sélectionner les coefficients désirés  $c_i, i = 1 \dots n - 1$  et les paramètres de synthèse  $\gamma_1, \gamma_2$  et  $\gamma_3$ .
3. Construire les fonctions de base et les règles floues.
4. Appliquer la loi de commande sur le système (IV.1).
5. Estimer les vecteurs de paramètres  $\hat{e}_f, \hat{e}_g$  et  $\hat{e}_p$  selon l'équation (IV.25) (IV.27) [40].

**IV.9 Résultats de simulation :**

Pour illustrer les performances de l'approche de commande proposée, nous considérons le problème de poursuite d'un bras manipulateur à hystérésis qui est décrit par les équations suivantes :

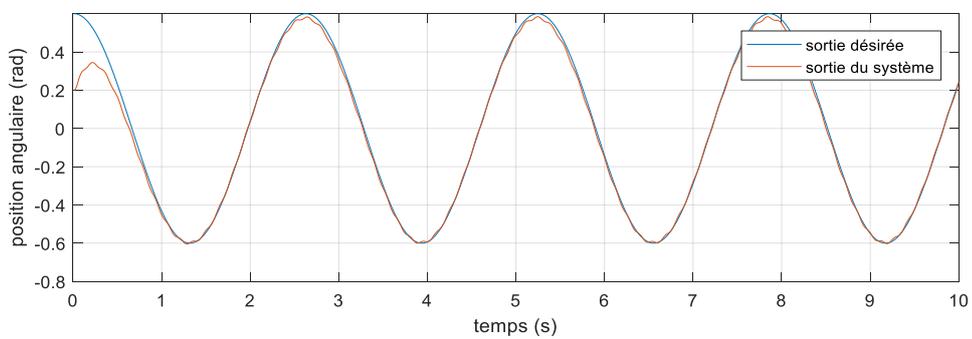


**Figure IV.7:** Schéma bloc de la commande sans modèle adaptative floue

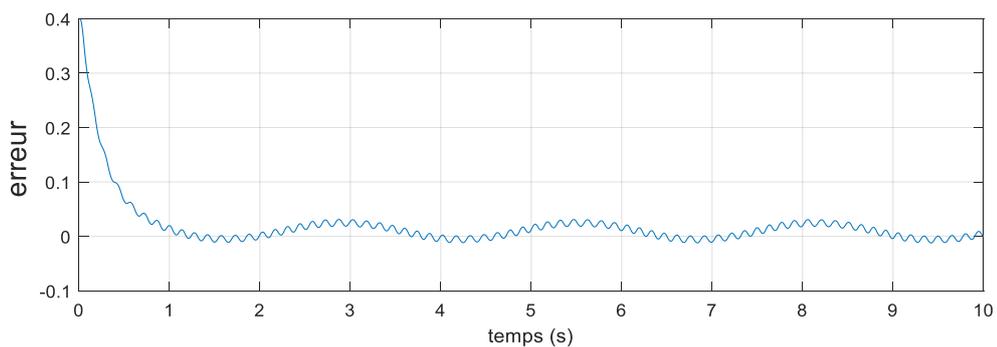
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \\ y = x_1 \end{array} \right. \quad (IV.36)$$

$$F(x) = \frac{g \sin x_1 - (m l (x_2)^2 \cos x_1 \sin x_1) / (m_p + m_c)}{l \left( \frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c) \right)}$$

$$G(x) = \frac{\cos x_1 / (m_p + m_c)}{l \left( \frac{4}{3} - m_p \cos^2 x_1 / (m_p + m_c) \right)}$$

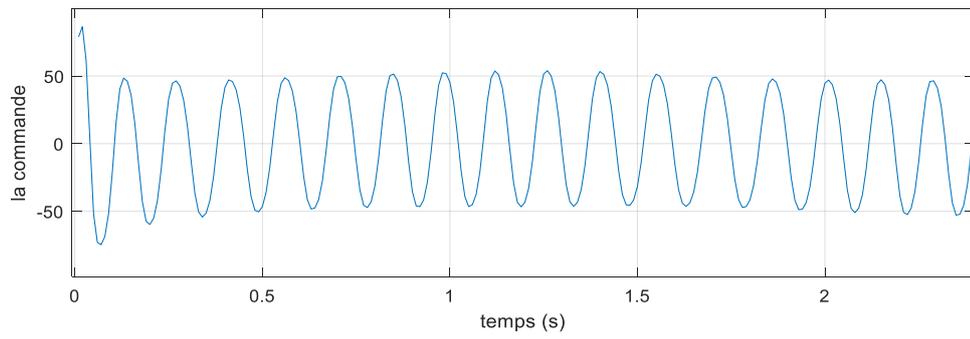


(a) Performance de poursuite

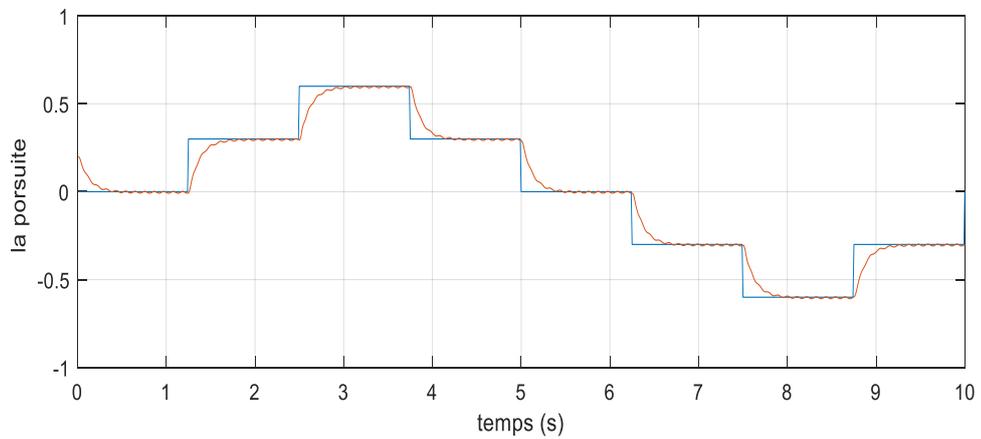


(b) Erreur de poursuite

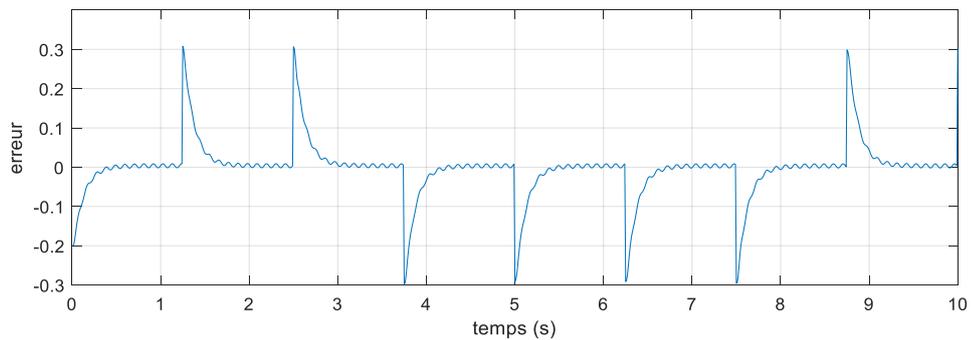
(c) Signal de commande



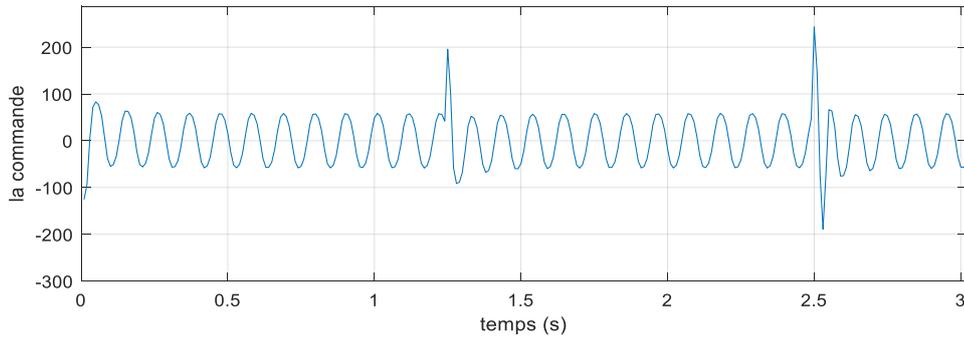
**Figure IV.8 :** Performances de poursuite pour un signal sinusoïdale



(d) Performance de poursuite



(e) Erreur de poursuite



(f) Signal de commande

**Figure IV.9:** Performances de poursuite pour un signale Carré

L'objectif de commande est de forcer la sortie du système à suivre la position désirée  $y_r = [y_r \quad z_d]$ ,  $z_d = 0.6 \cdot \cos(2.4 \cdot t)$  ou  $z_d = 0.6$ . Les dimensions de  $\theta_f$  et  $\theta_g$  sont choisies, avec des valeurs initiales sélectionnées dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Nous utilisons des fonctions d'appartenance Gaussienne définies comme suit :

$$\hat{F}_i^l(x_i) = \hat{G}_i^m(x_i) = \text{EXP} \left( -\frac{(x_i - c_i)^2}{2} \right) \quad (\text{IV.37})$$

Où 
$$c_i = \left[ -\frac{\delta}{6}, -\frac{\delta}{12}, \mathbf{0}, \frac{\delta}{12}, \frac{\delta}{6} \right].$$

Les résultats de simulation de la commande adaptative floue par modes glissants sont illustrés dans la figure(IV.8). La figure (IV.9)

Nous pouvons remarquer, de la figure (IV.8) que le temps de réponse est de  $t_r = 0.5$  s avec une erreur statique de 3%. Ces résultats montrent que l'erreur de poursuite converge rapidement vers la référence.

Pour la figure (IV.9) nous remarquons que le temps de réponse est de  $t_r = 0.5$  s avec une erreur statique de 6%. Ces résultats montrent que l'erreur de poursuite converge rapidement vers la référence.

**IV.10 Conclusion:**

Dans ce chapitre complètement inconnu  $f(x)$  et  $g(x)$ , nous avons trouvé une loi de contrôle qui garantit l'objet du contrôle, nous avons présenté une étude de la logique floue de ses types et le mystérieux principe de contrôle, d'une chose mystérieuse, et puis nous avons posé la situation du problème avec des hypothèses et des solutions qui nous permettent d'aborder le problème de la thèse.

## **CONCLUSION GENERALE**

Cette thèse a pour but de proposer de nouvelles stratégies de commande sans modèle pour des classes des systèmes non linéaires incertains. L'incapacité des approches de commande basées sur la connaissance de modèle du système à s'imposer dans le monde industriel. Pour remédier à ce problème, la tendance de recherche est de plus en plus orientée vers des algorithmes qui ne requièrent pas la connaissance du modèle du système à commander dans l'implémentation. Ce travail de mémoire s'inscrit aussi dans cette nouvelle tendance de recherche. Dans ce contexte, nous avons focalisé notre étude sur le développement des lois de commande stables, robustes et simples à implémenter. Pour montrer l'applicabilité de tous les algorithmes de commande proposés dans ce mémoire.

### **Le chapitre 1**

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept général de la commande sans-modèle. Pour cela, nous avons donné un aperçu des stratégies de commande sans-modèle. Cette étude bibliographique nous a permis de mettre en évidence la complexité de mise en œuvre d'une partie importante des lois de commande. Nous avons également constaté que la stabilité de certains programmes est non prouvée. Donc nous avons rappelé certains concepts de la stabilité des systèmes.

### **Le chapitre 2**

Ce chapitre est consacré à quelques généralités sur le pendule inversé. Nous avons commencé par donner et décrire quelques exemples de pendule inversé, Le pendule inversé sur deux roues, Le pendule inversé stabilisé par volant d'inertie, Le pendule double inversé (En parallèle et En cascade), Le pendule inversé rotatif (pendule de Furuta), Le pendule inversé sur un chariot, Types de pendule inversé. avec schèmes explicatifs.

### **Le chapitre 3**

Dans ce chapitre, nous avons supposé que  $f$  et  $g$  sont deux choses qui sont connues. Et support, feedback, description de la position de glissement, représentations d'état du pendule

inversé utilisant la loi de Newton, extraction des coordonnées centrales du poids avec l'axe cartésien, énergie de potentiel mécanique avec la dérivation des équations de Lagrange du pendule au système. Équations au pendule linéaire avec contrôle complet du pendule inversé à l'aide de Matlab.

#### **Le chapitre 4**

Dans ce chapitre complètement inconnu  $f(x)$  et  $g(x)$ , nous avons trouvé une loi de contrôle qui garantit l'objet du contrôle, nous avons présenté une étude de la logique floue de ses types et le mystérieux principe de contrôle, d'une chose mystérieuse, et puis nous avons posé la situation du problème avec des hypothèses et des solutions qui nous permettent d'aborder le problème de la thèse.

**BIBLIOGRAPHIE**

1. M.Krstic, P.V.Kokotovic et I. Kanellakopoulos, <<Nonlinear and Adaptive Control Design >>, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1st edition, 1995.
2. B. Ahlam, T. Sarah, <<Commande Sans Modèle d'un banc de Régulation de Température >>, Diplôme de Master en Automatique, Université ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, 2020.
3. B. AHSENE, <<Contribution à la Commande Sans Modelé des Systèmes Non Linéaires avec Applications >> Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2014.
4. Nous retenons l'appellation mod`ele phénoménologique de Fliess ([2] [3] [4] Mais, ils utilisent parfois l'appellation modèle ultra-locale, comme dans [5].
5. M. Fliess, C. Join, << Commande sans modèle et commande à modèle restreinte>>, STA Sciences et Technologies de l'Automatique, SEE - Société de l'Electricité, 2008
6. Soumia BENAOUA et Bouchera BERRICHI, <<Commande sans modèle d'un moteur à courant continu >>, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, du diplôme de MASTER ACADEMIQUE En : « Electrotechnique», 2020.
7. C. JOIN, J. MASSE, M. FLIESS, <<Étude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur>>, Université Henri Poincaré ,2016.
8. M.Fliess et C.Join, <<Intelligent PID controllers >> 16th Mediterrean Conference on Control and Automation, MCA – IEEE – GdR MACS, Jun 2008, Ajaccio, France.
9. M.KOUZI Katia, <<contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif>>, Thèse de Doctorat en Sciences, l'université de Batna, 2008.
10. Rashwan. SADOUNI <<Cours Commande intelligente>>, Master2\_Automatique et Systèmes, Université de Ghardaïa
11. M.Billel & B. Naima, << Commande par logique floue de type 2 et commande euro-floue appliquées à un pendule inversé>>, Mémoire de Master en électronique option automatique, Université de BLIDA 1 ,2015-2016.

12. S.BOUKAKA, <<réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative pour mas>>, l'université du Québec à Trois-Rivières, SEPTEMBRE 2015 Sciences, l'université de Batna, 2008.
13. CHEKROUN.Sofiane, <<Commande neuro-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasée>>, mémoire de magister en électrotechnique, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique d'Oran, Octobre 2009.
14. Chi-Li-Ma. Harnold and Kwang.Y.Lee, <<Application of the Free-Model Based Neural Networks in Model Reference Adaptive Inverse Control>>, Proceedings of the American Control Conférence Chicago, Illinois Jun 2000 University Park, PA 16802, USA.
15. J. Kanga, W. Menga, A. Abraham et, H. Luis, <<An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control>>,Article in Neurocomputing, DOI, 10.1016/j.neucom.2013.03.065, 135(0):79–85, July 2014.
16. N. Aouchar Et C.Bekhaled, <<Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateurs>>, mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état en électronique, école nationale polytechnique, juin 2005.
17. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule\\_invers%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule_invers%C3%A9).
18. K. BRAHIM, <<Analyse et modélisation du pendule inversé sur deux roues au fauteuil roulant automatisé Free Move>>, Université MONTPELLIER2.
19. W. Zhong and H. Röck, <<Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart >> In Proceedings of the 2001 IEEE international conference on control applications, Mexico City, Mexico, 2001
20. R.Olfati, Saber, <<Global stabilization of a flat under actuated system the inertia wheel pendulum>>, In 40th Conference on Decision and Control, Orlando, FL, 2001.
21. D. Choi and J.H. Oh.<<Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced- order disturbance observer>> In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA,USA, 2008.
22. A. Toufik, <<Commande des Systèmes Non Linéaires>>, par Mode Glissant Flou , UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER DE BISKRA , 2009.
23. L.Lagarrigue, François rouchon, Pierrc (SOuS la direction de), <<Commandes non linéaires >>Paris, Herrnès Science Publications, 2003.
24. M. Krstić, I. Kanellakopoulos, and P. V. Kokotović, <<Nonlinear and adaptive control design>>, Ed. John Wiley and Sons, New York, 1995.

25. M. Mokhtar, <<Commande Adaptative des Systèmes Non linéaires par l'Approche Backstepping Neuronale>>, Université Hadj Lakhdar Batna.2015.
26. Hong, Y. Yang, G., Cheng, D., Spurgeon, S, << A new approach to terminal sliding mode control design>>, Asian Journal of Control, Vol. 7, No. 2 (2005) 177-181.
27. Munoz, E., Gaviria, C., Vivas, A.<< Terminal sliding control for a SCARA robot>>, International Conference on Control, Instrumentation and Mechatronics Engineering, Johor Bahru, Johor, Malaysia (2007)
28. Karl Johan Astrom, Richard M Murray << système de rétroaction>>, PRINCETON UNIVERSITY PRESS AND OXFORD, 2009
29. F. LAH, << Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue Application à un pendule inversé>>, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, 2011
30. <https://www.youtube.com/watch?v=5qJY-ZaKSic>.
31. All content following this page was uploaded by Giuseppe Carbone on 26 June 2018.
32. <https://www.youtube.com/watch?v=Fo7kuUAHj3s>
33. Samer .R, <<Contribution à l'estimation et à la commande de systèmes Mécaniques sous-actionnés, >>
34. Hand, L. N. Finch, J. D, <<Analytical Mechanics (2nd Ed.)>>, Cambridge University Press. p. 23. 2008.
35. L.X. Wang, <<Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis>>, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.
36. C.Y. Chang, <<Adaptive fuzzy-based tracking control for nonlinear SISO systems via VSS and H<sub>∞</sub> approaches, >>, IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol 9, pp. 278-292, 2001.
37. J.E. Slotine and W. Li, <<Applied nonlinear control>>, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
38. Salim. LABIOD, <<Contribution à la Commande Adaptative Floue des Systèmes Non Linéaires>>, Ecole Nationale Polytechnique .2005.
39. Hamid .BOUBERTAKH. <<Contribution à l'Optimisation par Algorithmes Evolutionnaires des Commandes Flous >>, Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire de Commande des Processus. 2009.
40. REBAI . Aissa, <<Contribution à l'identification et la commande des systèmes à hystérésis : Application aux actionneurs piézoélectriques >>,Ecole Nationale Polytechnique Département d'Automatique 2016

41. A. Rebai, K. Guesmi, and B. Hemici, <<Design of an adaptive fuzzy sliding mode controller for nonlinear hysteretic systems>>, In 4th International Conference on Electrical Engineering - ICEE'15. Boumerdes, Algeria, December 13-15 2015.