

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N°: /AUT/ 2024



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE: AUTOMATIQUE

OPTION: AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par : BARKAT Aimen et BAALI Souleyman

Intitulé

**Étude d'un Système Electromécanique Chariot-
Pendule à Deux Degré De Liberté
« Application aux Systèmes de Grues à Conteneurs »**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. BOUGUERRA Abderrahmen	Université de M'sila	Président
Dr. GHELLAB Mohamed Zinelaabidine	Université de M'sila	Encadreur
Pr. ZEGHLACHE Samir	Université de M'sila	Co- Encadreur
Dr. MEKKI Hemza	Université de M'sila	Examineur
Mr. BACHIR Zohir	Société ALGAL plus	Invité

Année universitaire : 2023 /2024

شكر وتقدير

قال تعالى: " لئن شكرتم لأزيدنكم "

و قال رسول الله صلى الله عليه وسلم: " من لم يشكر الناس لا يشكر الله " الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

بكل فخر واعتزاز، نتوجه بجزيل الشكر والتقدير ل الدكتور **غالب محمد زين العابدين** و

البروفيسور **زغلال سمير** على الثقة التي أولوها لنا من خلال الترحيب بنا في فريقهم وقبولهم

الإشراف على عملنا، وتوجيهاتهم القيمة ونصائحهم السديدة التي كانت عوناً كبيراً لنا في إعداد هذه المذكرة

كما نتوجه بالشكر والعرفان لطالبة الدكتوراه **سعودي خديجة** على نصائحها القيمة متمنين لها

التوفيق والنجاح في بقية مسيرتها العلمية والعملية ، أيضاً نتوجه بخالص شكرنا إلى أعضاء لجنة التحكيم لتقييم هذا العمل.

إهداء

إلى أمي رحمها الله.

إلى والديّ العزيز أطل الله في عمره، شكراً لكم على كل لحظة دعم وحب وتضحية. أنتما النور الذي أضاء لي درب العلم والمعرفة، ولولاكم لما وصلت إلى ما أنا عليه اليوم. أهدىكم هذا الإنجاز تقديراً لعطائكما الذي لا ينضب.

إلى إخوتي وأختي، مصدر قوتي وإلهامي. كنتم دائماً بجانبني، مشجعين وداعمين، أهدىكم هذه المذكرة عرفاناً بفضلكم

إلى أخي وزميلي **بعلی سلیمان** الذي رافقني في إنجاز هذه المذكرة، كانت شراكتنا تجربة مميزة،

شكراً لك على تفانيك وإخلاصك وأتمنى لك دوام التوفيق والنجاح في مسيرتك المهنية والعلمية

إلى أصدقائي وزملائي، شركاء الدرب والمشوار، أهدىكم هذا النجاح شكراً على دعمكم وتشجيعكم المستمر

وأخيراً، إلى كل من آمن بي وساندني ولو بكلمة طيبة، أهدىكم هذا الإنجاز آملاً أن يكون بداية لمستقبل مشرق وناجح

مع خالص المحبة والتقدير

بركان

إهداء

إلى والديّ العزيزين أطال الله في عمرهما، شكراً لكم على كل لحظة دعم وحب وتضحية. أنتما النور الذي أضاء لي درب العلم والمعرفة، ولولاكم لما وصلت إلى ما أنا عليه اليوم. أهدىكم هذا الإنجاز تقديراً لعطائكما الذي لا ينضب.

إلى إخوتي وأختي، مصدر قوتي وإلهامي. كنتم دائماً بجانبني، مشجعين وداعمين، أهدىكم هذه المذكرة عرفاناً بفضلكم

إلى أخي وزميلي **بركان** الذي رافقني في إنجاز هذه المذكرة، كانت شراكتنا تجربة

مميزة، شكراً لك على تفانيك وإخلاصك وأتمنى لك دوام التوفيق والنجاح في مسيرتك المهنية والعلمية

إلى أصدقائي وزملائي، شركاء الدرب والمشوار، أهدىكم هذا النجاح شكراً على دعمكم وتشجيعكم المستمر

وأخيراً، إلى كل من آمن بي وساندني ولو بكلمة طيبة، أهدىكم هذا الإنجاز آملاً أن يكون بداية لمستقبل مشرق وناجح

مع خالص المحبة والتقدير

بعلي سليمان

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

CHAPITRE-1 : DESCRIPTION ET MODELISATION ET D'UN PENDULE_CHARIOT

I.1. Introduction	03
I.2. Description de système pendule_chariot	03
I.3. Domaine d'application de pendule-chariot	04
I.4. Modélisation du système	05
I.4.1. Énergie potentielle	07
I.4.2. Énergie cinétique	08
I.5. Modèle d'état du système pendule-chariot	10
I.6. Conclusion	12

CHAPITRE-2 : COMMANDE PID-FLOU ADAPTATIF

II.1. Introduction	13
II.2. . Description de la commande PID.....	13
II.2.1. Commande PID du pendule chariot	13
II.3. Résultats expérimentaux	14
II.3.1. Test de poursuite de trajectoire	14
II.3.2. Test de robustesse	16
II.4. Commande adaptative	17
II.4.1. Commande PID- adaptative d'un système pendule chariot	18
II.5. L'application de la Commande PID adaptatif	19
II.5.1. Fonctions d'appartenance	19

II.5.2. Table des règles floues	20
II.5.3. La surface de superviseur	21
II.6. Résultats expérimentaux	22
II.6.1. Test de poursuite de trajectoire	22
II.6.2. Test de robustesse	26
II.7. Conclusion	26

CHAPITRE-3 : COMMANDE MODE GLISSANT AVEC SUPERVISEUR FLOU

III.1. Introduction	27
III.2. Principe de la commande par mode de glissement	27
III.2.1 La commande décentralisée	28
III.3. Conception de la commande par mode glissant	29
III.3.1. Phénomène de « Chattering ».....	29
III.3.2. Elimination du phénomène de « Chattering »	30
III.3.3. Choix de la surface de glissement	30
III.3.4. Condition d'existence du mode de glissement (attractivité)	31
III.3.5. Détermination de la loi commande	31
III.4. Résultats expérimentaux	33
III.5. L'application de la Commande par mode glissant adaptative	35
III.5.1. Fonctions d'appartenance	36
III.5.2. Table des règles floues	37
III.5.3. La surface de superviseur	38
III.6. Résultats expérimentaux	39
III.7. Interprétation	40
III.8. Etude Comparative	41
III.9. Conclusion	41
CONCLUSION GENERALE	42

RERERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Figure I.1: Prototype d'un système pendule-chariot	03
Figure I.2: Système pendule – chariot.....	04
Figure I.3: Système de grues à conteneurs.....	04
Figure I.4: Pont Roulant.....	05
Figure I.5: Représentation des forces auxquelles soumis le système	05
Figure II.1: Schéma bloc de la commande PID classique appliquée au système de chariot-pendule.....	14
Figure II.2: La position de chariot avec entré sinusoïdal.....	14
Figure II.3: L'angle de pendule avec entré sinusoïdal	15
Figure II.4 : Signal de commande	15
Figure II.5: La position de chariot avec entré rectangulaire.....	15
Figure II.6 : L'angle de pendule avec entré rectangulaire.....	16
Figure II.7 : Signal de commande	16
Figure II.8 : La position de chariot avec entré sinusoïdal.....	16
Figure II.9 : L'angle de pendule avec entré sinusoïdal.....	17
Figure II.10 : Signal de commande.....	17
Figure II.11 : Structure de base d'une commande adaptative	18
Figure II.12 : Schéma fonctionnel de la commande PID ADAPTATIF	18
Figure II.13 : Les fonctions d'appartenance des entrées e , de et des sorties $K(K_p, K_d)$	19
Figure II.14 : Les fonctions d'appartenance des entrées e , de et des sorties $K(K_i)$	20
Figure II.15 : La surface de gain K_p	21
Figure II.16 : La surface de gain K_i	21
Figure II.17 : La surface de gain K_d	21
Figure II.18 : La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de la position.....	22
Figure II.19 : La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de la position	22
Figure II.20: La position de chariot avec entré sinusoïdal.....	23
Figure II.21 : L'angle de pendule avec entré sinusoïdal.....	23
Figure II.22 : Signal de commande.....	23
Figure II.23 : La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de la position.....	24

Figure II.24 La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de l'angle.....	24
Figure II.25 : La position de chariot avec entré rectangulaire.....	25
Figure II.26 : L'angle de pendule avec entré rectangulaire.....	25
Figure II.27 : Signal de commande	25
Figure II.28 : L'angle de pendule avec entré sinusoïdal	26
Figure II.29 : La position de chariot avec entré sinusoïdal.....	26
Figure II.30 : Signal de commande.....	26
Figure III.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état	28
Figure III.2 : Fonction SAT	30
Figure III.3 : Schéma bloc de la commande par mode glissant appliquée au système de pendule-chariot.....	33
Figure III.4 : La position de chariot avec entré sinusoïdal.....	33
Figure III.5 : L'angle de pendule avec entré sinusoïdal.....	34
Figure III.6 : Signal de commande.....	34
Figure III.7 : La position de chariot avec entré rectangulaire.....	34
Figure III.8 : L'angle de pendule avec entré rectangulaire.....	35
Figure III.9 : Signal de commande.....	35
Figure III.10 : Contrôleur flou type-2 de supervision.....	36
Figure III.11 : Les fonctions d'appartenances pour les entrées (e et de) et la sortie K_j .	37
Figure III.12 : La surface de superviseur.....	38
Figure III.13 : Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant avec gain adaptatif appliquée au système de chariot-pendule.....	38
Figure III.14 : La variation de gain K.....	39
Figure III.15 : La position de chariot avec entré sinusoïdal	39
Figure III.16 : L'angle de pendule avec entré sinusoïdal.....	40
Figure III.17 : Signal de commande.....	40

Liste des tableaux

Tableau I.1: Paramètres du système pendule – chariot	06
Tableau II.1: Les variables linguistiques d'entrées.....	19
Tableau II.2: Les Règles d'inférence pour les gains K_p , K_i et K_d	20
Tableau III.1: Les différents termes linguistiques des variables d'entrées et de sortie.....	36
Tableau III.2: Règle d'inférence pour le superviseur du contrôleur CGFA.....	37
Tableau III.3: Comparaison quantitative entre les commandes développées pour le pendule-chariot.....	41

Liste des abréviations

PID : Proportionnel-Intégral-Dérivé

MRAC : Model Reference Adaptive Control

STR : Self-Tuning Regulator

S : Small

M : Medium

B : Big

PIDA : Proportionnel-Intégral-Dérivé adaptatif

MG : mode glissant

MGA : mode glissant adaptatif

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'objectif de l'automatique moderne est l'élaboration de lois de commande simples et performantes pour conférer aux systèmes physiques des propriétés qu'ils n'avaient pas naturellement ou leur renforcer certaines propriétés déjà pourvues. L'automatisation est un besoin qui se généralise dans tous les secteurs de l'industrie moderne. C'est en effet, la solution qui permet de contrôler un processus industriel ou un système physique pour atteindre et réussir à obtenir de très hautes performances.

Les avancées récentes de l'automatique sont le fruit des progrès techniques réalisés en informatique industrielle, des moyens puissants de calcul, et la résolution de problèmes mathématiques complexes. Ainsi, différentes stratégies de commande ont été développées pour des systèmes linéaires et non linéaires.

Le système chariot-pendule est un très bon exemple de ce prototype réel tels que la grue portique de conteneurs et les systèmes de guidage pont roulant dans l'industrie [1]. Il est caractérisé par des comportements physiques non-linéaires difficilement modélisables. Cette caractéristique a motivé les chercheurs pour utiliser ces prototypes afin de valider et tester les lois de commande développées théoriquement [2] [3]. De plus, l'utilisation des commandes modernes et intelligentes est plus que nécessaire.

Le présent travail est constitué de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la modélisation de la dynamique d'un système chariot - pendule à deux degrés de liberté en utilisant la formule Euler-Lagrange.

En se basant sur le régulateur PID, nous proposerons dans le deuxième chapitre, une commande PID adaptatif dont les paramètres sont déterminés en utilisant la logique floue. Les deux techniques sont appliquées sur le prototype de pendule-chariot à deux degrés de liberté. A la fin du chapitre, nous présentons également les résultats expérimentaux du système contrôlé, qui permettent d'évaluer les performances de ce contrôle.

Le troisième chapitre est consacré à la commande par mode de glissement avec des surfaces de glissement linéaires. Ensuite nous présentons la synthèse d'une commande par mode glissant avec gain adaptatif basé sur la logique floue. De plus, nous présentons les résultats expérimentaux de ces commandes. Enfin, nous présentons aussi, dans ce chapitre, une étude comparative entre les différentes lois de commandes développées pour évaluer leur performance et leur robustesse.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Nous terminons ainsi cette mémoire par une conclusion générale qui situe la valeur du travail effectué et fournit une liste de propositions concernant les améliorations futures à considérer ainsi que les perspectives et orientations possibles de ce travail.

CHAPITRE-1

DESCRIPTION ET MODELISATION D'UN PENDULE_ CHARIOT

I.1.Introduction :

Le pendule est un système instable, SIMO (Single Input Multiple Output) qui possède des non linéaires non négligeables dues à sa structure dynamique et aux forces de friction. C'est un outil didactique et un problème classique utilisé en automatique. C'est pourquoi il est utilisé pour tester les performances et la robustesse de nouvelles lois de commande [4].

I.2. Description de système pendule-chariot :

Le système chariot avec pendule est un système multi-variable non linéaire instable avec des constantes de temps très rapides. Ce système est reconnu pour être une plate-forme difficilement stable [5].

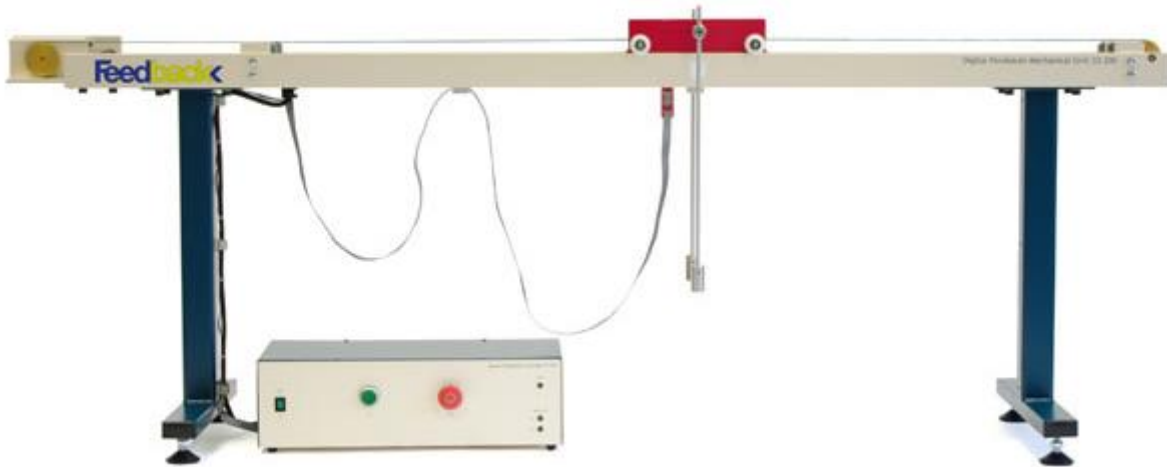


Fig (I.1) Prototype d'un système pendule-chariot [1].

Le système décrit dans la **Fig (I.1)** se compose d'un chariot se déplaçant horizontalement le long d'un axe, avec un pendule suspendu et libre qui est fixé verticalement sur ce chariot. L'application d'une force horizontale $F(t)$ sur le chariot entraîne un déplacement de x mètres de celui-ci ainsi qu'une rotation de θ radians du pendule, Quand le pendule penche vers la droite, le chariot doit le rattraper en effectuant un mouvement vers la droite, et inversement. La difficulté c'est de régler l'intensité et la forme de la réaction du chariot en fonction de l'angle que le pendule fait avec la verticale [6] Ce système, caractérisé par le chariot avec pendule, est intrinsèquement instable en boucle ouverte, non linéaire multi variable et sous actionné.

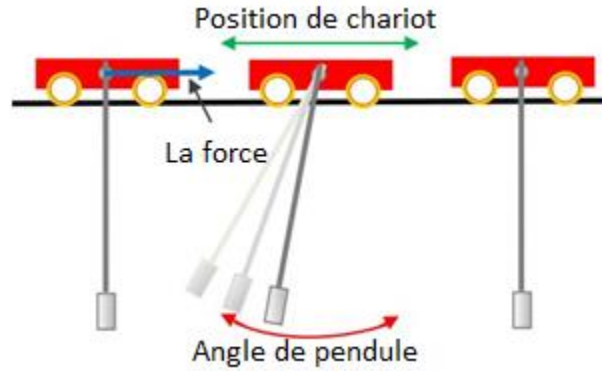


Fig.(I.2). Système pendule – chariot.

I.3. Domaine d'application de pendule-chariot :

Le pendule chariot trouve des applications dans plusieurs domaines industriels en raison de sa capacité à modéliser et à résoudre des problèmes complexes de dynamique et de contrôle. Voici les domaines d'application principaux :

- Systèmes de grues à conteneurs : Les grues à conteneurs sont des équipements essentiels dans les ports et les terminaux de conteneurs pour le chargement et le déchargement des conteneurs des navires. L'utilisation du concept du pendule chariot dans les systèmes de grues à conteneurs permet de résoudre plusieurs défis en matière de contrôle et de stabilité.



Fig.(I.3). Système de grues à conteneurs.

- Pont Roulant : L'application du concept de pendule chariot dans les ponts roulants concerne principalement la stabilité et contrôle précis des charges en mouvement.

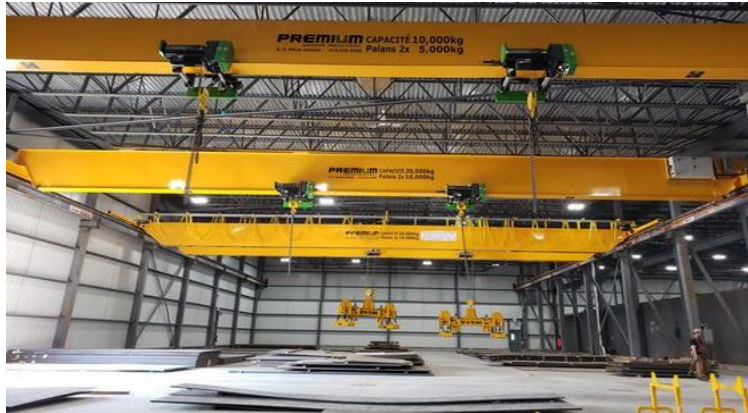


Fig.(I.4). Pont Roulant.

I.4. Modélisation du système :

Toute formulation d'un modèle mathématique des systèmes mécaniques nécessite la représentation des forces subies par ces systèmes. Cela est représenté par la figure ci-dessous.

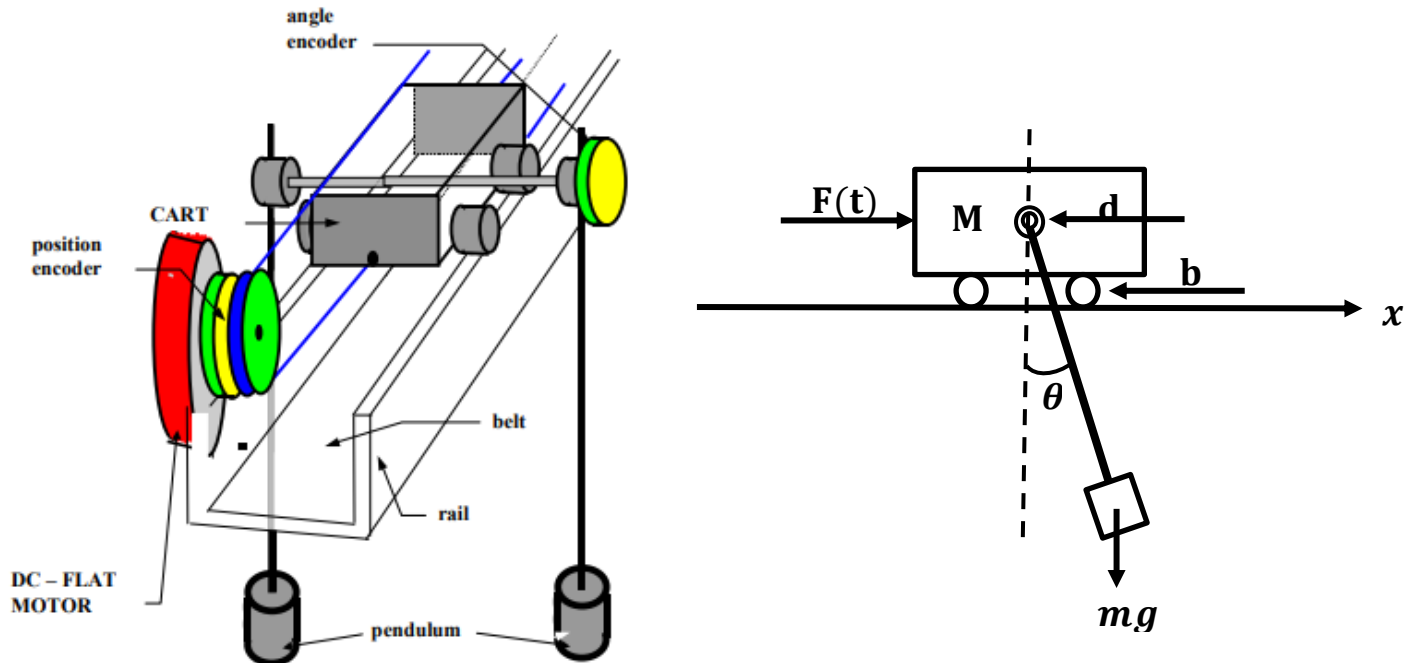


Fig.(I.5). Représentation mécanique du système chariot-pendule.

Les paramètres du système pendulaire sont donnés dans le tableau suivant :

Symbole	Définition	Valeur
M	<i>Masse du chariot</i>	2.3 kg
m	<i>Masse du pendule</i>	0.2 kg
l	<i>Longueur du pendule</i>	0.36 m
I	<i>Moment d'inertie</i>	0.099 kg.m ²
b	<i>Frottements de déplacement du chariot</i>	0.05 kg.m ² /s
d	<i>Frottements du pendule</i>	0.005 kg.m ² /s
g	<i>Intensité de pesanteur</i>	9.81 m/s ²
F(t)	<i>Force exercée sur le chariot</i>	/
θ(t)	<i>L'angle du pendule</i>	/

Tableau (I.1). Paramètres du système pendule – chariot.

Le système possède deux degrés de liberté $x(t)$ et $\theta(t)$, pour modéliser un système tel qu'un pendule, nous devons passer par une phase de modélisation. Cette étape est cruciale pour comprendre le comportement dynamique du pendule. Une approche couramment utilisée est la méthode de Lagrange, qui offre l'avantage de sa généralité en se basant sur le principe de conservation de l'énergie mécanique.

La méthode de Lagrange repose sur l'idée fondamentale que le Lagrangien, défini comme la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système, peut être utilisé pour obtenir les équations du mouvement du système. Cette approche évite les pièges de la complexité mathématique en offrant un cadre élégant pour dériver les équations différentielles régissant le mouvement du pendule.

La méthode de Lagrange défini par les équations suivantes :

$$F = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_f}{\partial \dot{q}_i} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

L : Le lagrangien.

$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$: La dérivée partielle de **L** par rapport à la vitesse généralisée \dot{q}_i .

$\frac{\partial L}{\partial q_i}$: La dérivée partielle de **L** par rapport à la coordonnée généralisée q_i .

$\frac{\partial E_f}{\partial \dot{q}_i}$: La dérivée partielle de les forces de frottement **E_f** par rapport à la vitesse généralisée \dot{q}_i .

F : La force généralisée associée à q_i .

Le Lagrangien étant défini par :

$$L = E_c - E_p \quad (\text{I.2})$$

Avec :

E_c : Energie cinétique.

E_p : Energie potentielle.

Nous pouvons exprimer la projection de la position du centre de gravité du pendule sur les axes x et y comme suit :

$$X_p = x + l \sin \theta \quad (\text{I.3})$$

$$Y_p = l \cos \theta \quad (\text{I.4})$$

I.4.1 Énergie potentielle :

$$E_p = mgY_p \quad (\text{I.5})$$

En remplaçant l'équation (I.4) dans l'équation (I.5) :

$$E_p = mgl \cos \theta \quad (\text{I.6})$$

I.4.2 Énergie cinétique :

L'énergie cinétique de ce système est calculée par la somme de l'énergie cinétique de chariot et l'énergie cinétique de pendule :

$$E_c = E_{CP} + E_{CC} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

E_{CP} : C'est l'énergie cinétique de pendule.

E_{CC} : C'est l'énergie cinétique de chariot.

L'énergie cinétique de chariot :

$$E_{CC} = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (\text{I.8})$$

L'énergie cinétique de pendule :

$$E_{CP} = \frac{1}{2} m V_p^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (\text{I.9})$$

$$\vec{V}_p = \dot{X}_p \vec{i} + \dot{Y}_p \vec{j} \quad (\text{I.10})$$

Nous pouvons déterminer le module de la vitesse du centre de gravité du pendule en utilisant la formule suivante :

$$V_p = \|\vec{V}_p\| = \sqrt{(\dot{X}_p)^2 + (\dot{Y}_p)^2} \quad (\text{I.11})$$

$$\Rightarrow V_p^2 = (\dot{X}_p)^2 + (\dot{Y}_p)^2$$

Avec :

V_p : La vitesse du centre de gravité du pendule

Nous pouvons exprimer la projection de la position du centre de gravité du pendule sur les axes x et y comme suit :

$$X_p = x + l \sin \theta \quad (\text{I.12})$$

$$Y_p = l \cos \theta \quad (\text{I.13})$$

En dérivant les équations (I.12) et (I.13)

$$\dot{X}_p = \dot{x} + l\dot{\theta} \cos \theta \quad (\text{I.14})$$

$$\dot{Y}_p = -l\dot{\theta} \sin \theta \quad (\text{I.15})$$

D'après les équations (I.8) et (I.9) :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_p^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\theta} \cos \theta + l^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + l^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2l\dot{x}\dot{\theta} \cos \theta + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

L'énergie cinétique de l'ensemble chariot-pendule est :

$$E_c = \frac{1}{2} (m + M) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 + m l \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (\text{I.16})$$

En remplaçant les équations (I.6) et (I.16) dans l'équation (I.2) :

$$L = \frac{1}{2} (m + M) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 + m l \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - m g l \cos \theta \quad (\text{I.17})$$

L'équation de Lagrange pour le degré de liberté q(t)=x(t) :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial x} \right) + \frac{\partial E_f}{\partial x} = F$$

$$\frac{d}{dt} (M\dot{x} + m\dot{x} + ml\dot{\theta} \cos \theta) + b\dot{x} = F$$

$$(M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + b\dot{x} = F \quad (\text{I.18})$$

L'équation de Lagrange pour le degré de liberté $q(t)=\theta(t)$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial E_f}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{d}{dt} (ml\dot{x} \cos \theta + ml^2 \dot{\theta} + I\dot{\theta}) - (-ml\dot{x}\dot{\theta} \sin \theta + mgl \sin \theta) + d\dot{\theta} = 0$$

$$ml^2 \ddot{\theta} + ml\ddot{x} \cos \theta - ml\dot{x}\dot{\theta} \sin \theta + I\ddot{\theta} + ml\dot{x}\dot{\theta} \sin \theta - mgl \sin \theta + d\dot{\theta} = 0$$

$$(I + ml^2) \ddot{\theta} + ml\ddot{x} \cos \theta - mgl \sin \theta + d\dot{\theta} = 0 \quad (\text{I.19})$$

Finalement, le modèle du système pendule-chariot est représenté par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + b\dot{x} = F \\ (I + ml^2)\ddot{\theta} + ml\ddot{x} \cos \theta - mgl \sin \theta + d\dot{\theta} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

I.5. Modèle d'état du système pendule-chariot :

Les variables d'état du système sont :

$$\begin{cases} x_1 = x \\ x_2 = \dot{x} \\ x_3 = \theta \\ x_4 = \dot{\theta} \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

Avec :

x : La position du chariot

\dot{x} : La vitesse du chariot

θ : La position angulaire du pendule

$\dot{\theta}$: La vitesse angulaire du pendule

$F = U$: La commande

On dérive l'équation (I.21) :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{x} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \ddot{\theta} \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

On tire $\ddot{\theta}$ de (I.19) et on le remplace dans (I.18) pour calculer le modèle dynamique :

$$\ddot{x} = \frac{(I+ml^2)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) - (ml\cos\theta)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} + \frac{(I+ml^2)}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} U \quad (\text{I.23})$$

$$\ddot{x} = f_1 + g_1 U$$

Avec :

$$f_1 = \frac{(I + ml^2)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) - (ml\cos\theta)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m + M)(I + ml^2) - (ml\cos\theta)^2}$$

$$g_1 = \frac{(I + ml^2)}{(m + M)(I + ml^2) - (ml\cos\theta)^2}$$

On tire \ddot{x} de (I.18) et on le remplace dans (I.19) pour calculer le modèle dynamique :

$$\ddot{\theta} = \frac{(-ml\cos\theta)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) + (m+M)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} + \frac{(-ml\cos\theta)}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} U \quad (\text{I.24})$$

$$\ddot{\theta} = f_2 + g_2 U$$

Avec :

$$f_2 = \frac{(-ml\cos\theta)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) + (m + M)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m + M)(I + ml^2) - (ml\cos\theta)^2}$$

$$g_2 = \frac{(-ml\cos\theta)}{(m + M)(I + ml^2) - (ml\cos\theta)^2}$$

La forme matricielle de l'équation (I.20) est donnée par :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{(I+ml^2)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) - (ml\cos\theta)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} \\ x_4 \\ \frac{(-ml\cos\theta)(-ml\dot{\theta}^2 \sin\theta - b\dot{x}) + (m+M)(mg\sin\theta - d\dot{\theta})}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(I+ml^2)}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} \\ 0 \\ \frac{(-ml\cos\theta)}{(m+M)(I+ml^2) - (ml\cos\theta)^2} \end{bmatrix} U \quad (\text{I.25})$$

I.6. Conclusion :

En conclusion, la modélisation et la description d'un système pendule-chariot constituent des étapes essentielles pour comprendre et analyser le comportement dynamique de ce système complexe. À travers ce chapitre, nous avons exploré les différentes approches de modélisation, en détaillant les équations du mouvement et en illustrant les interactions entre le chariot et le pendule. Cette analyse nous a permis de mettre en lumière les défis et les caractéristiques uniques de ce système, offrant ainsi une base solide pour les études ultérieures de contrôle et de simulation. La compréhension approfondie de ces modèles théoriques est cruciale pour le développement de stratégies de commande efficaces et robustes, nécessaires pour stabiliser et optimiser le fonctionnement du pendule-chariot dans diverses applications pratiques.

CHAPITRE-II

COMMANDE PID-FLOU ADAPTATIF

II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'application et la comparaison de différentes lois de commandes, d'abord une commande classique telle que la régulation PID et une commande hybride intelligente PID floue. Une présentation complète des détails de la mise en œuvre d'un contrôleur PID flou adaptatif (PIDA) destiné pour la commande d'un prototype du système pendule-chariot ainsi que des tests de poursuite de trajectoire et de robustesse sont les opérations effectuées dans cette partie. Nous présentons également les résultats expérimentaux et démontrons la robustesse de cette approche.

II.2. Description de la commande PID :

Les contrôleurs PID sont utilisés généralement dans les systèmes de contrôle industriel. Le contrôleur calcule d'abord une valeur d'erreur, qui est la différence entre une variable mesurée $y(t)$ et un point de consigne préféré y_{ref} , il essaie ensuite de minimiser cette erreur en augmentant ou en diminuant les entrées de commande dans le processus afin que la sortie du processus $y(t)$ se rapproche du point de consigne. Pour augmenter les performances, par exemple en augmentant la réactivité du système, les paramètres PID doivent être ajustés en fonction de l'application en question [7][8].

Un contrôleur PID se constitue de 3 actions différentes qui sont l'action proportionnelle (P), l'action intégrale (I) et l'action dérivée (D). Chaque élément a un effet différent sur le système. La sortie du régulateur est de la forme :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$U = \begin{cases} U_x = K_{px} e_1 + K_{ix} \int_0^t e_1 dt + K_{dx} \frac{de_1}{dt} \\ U_\theta = K_{p\theta} e_2 + K_{i\theta} \int_0^t e_2 dt + K_{d\theta} \frac{de_2}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

II.2.1. Commande PID du pendule chariot :

Le pendule chariot est déjà présenté dans le chapitre 1. Ce système possède deux degrés de liberté (SIMO). Le calcul de la commande PID est crucial pour stabiliser le pendule en position verticale tout en contrôlant la position du chariot. La commande PID utilise une combinaison de termes proportionnels (P), intégral (I) et dérivé (D) pour corriger l'erreur entre la position souhaitée et la position actuelle, ainsi que l'angle.

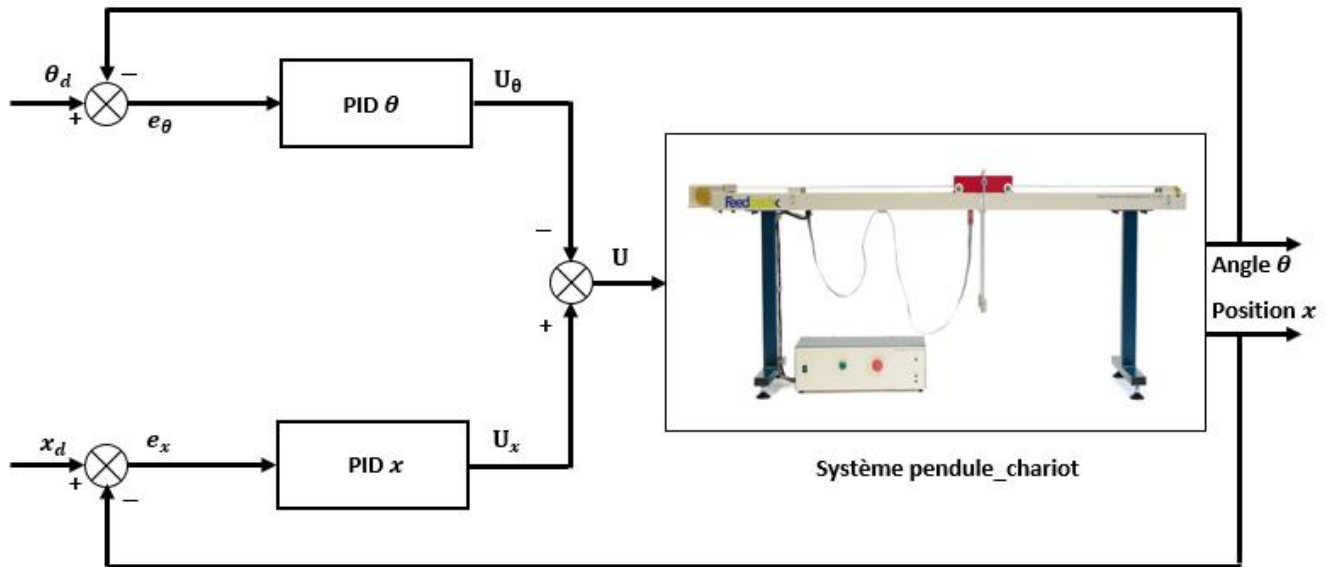


Fig.(II.1). Schéma bloc de la commande PID classique appliquée au système de chariot-pendule.

II.3. Résultats expérimentaux :

II.3.1 Test de poursuite de trajectoire :

Les valeurs des paramètres des régulateurs sont ajustées expérimentalement après plusieurs essais de simulation :

$$K_{px} = 7, K_{ix} = 5, K_{dx} = 1, K_{p\theta} = 0.7, K_{i\theta} = 0.01, K_{d\theta} = 0.2.$$

Les figures ci-dessous représenté la sortie et le signal de commande :

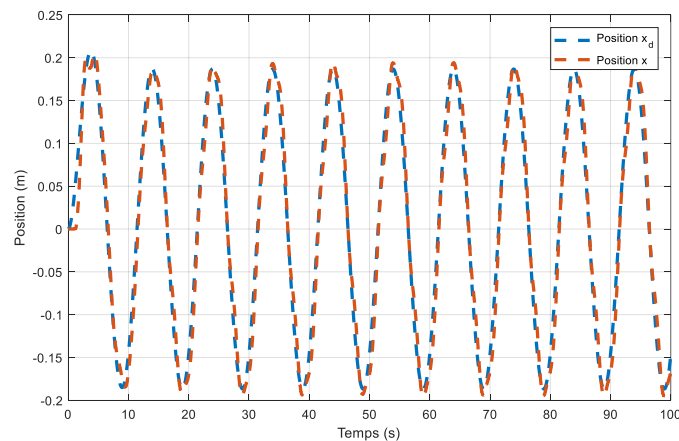


Fig.(II.2). La position de chariot avec entrée sinusoïdal.

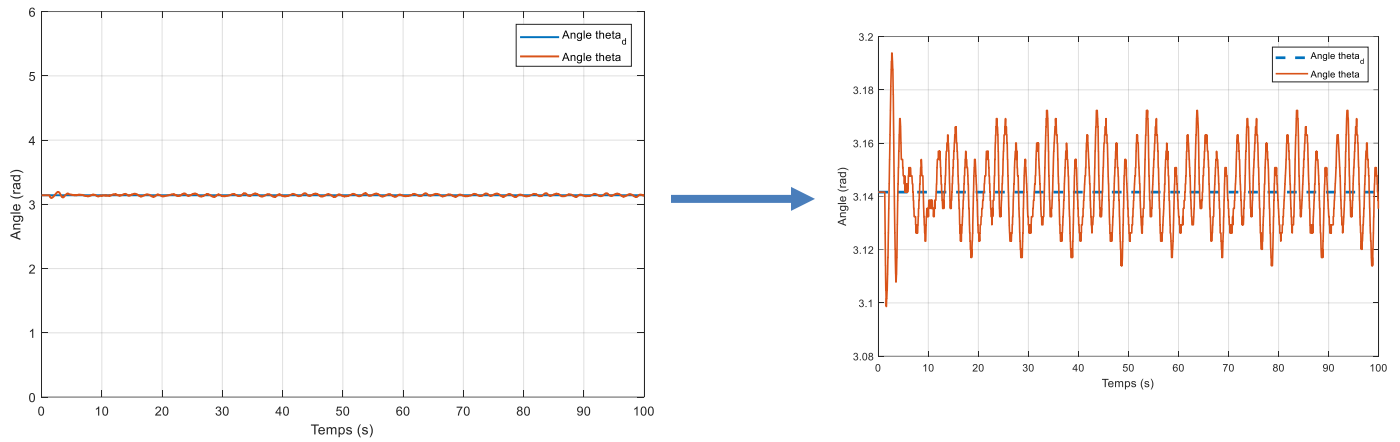


Fig.(II.3). L'angle de pendule avec entrée sinusoïdal.

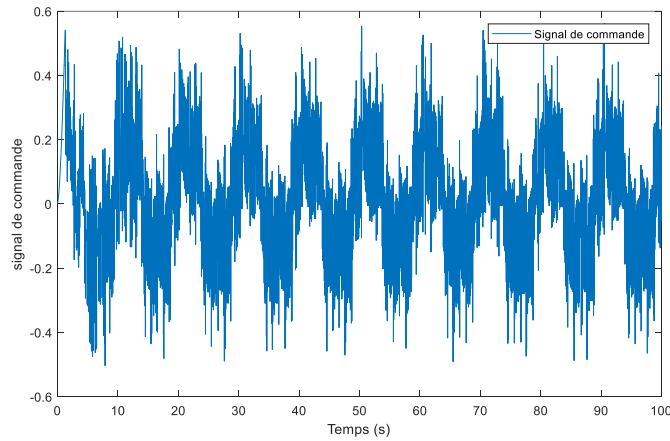


Fig.(II.4). Signal de commande.

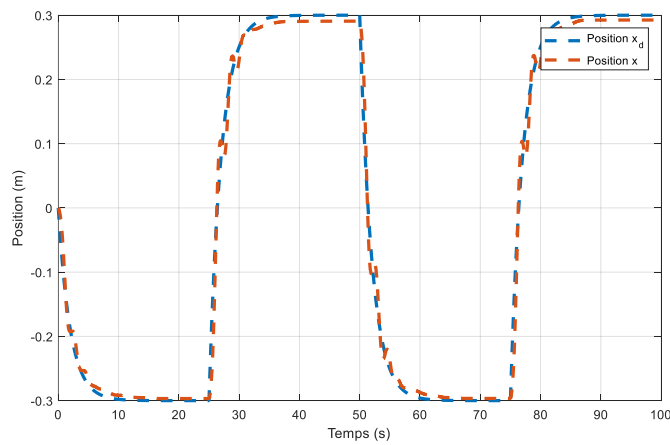


Fig.(II.5). La position de chariot avec entrée rectangulaire.

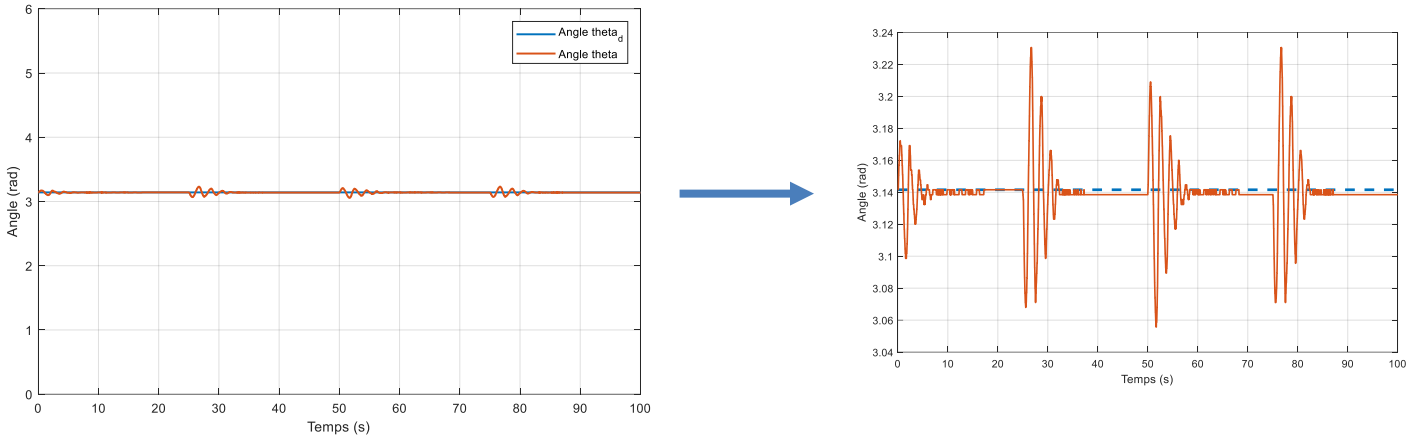


Fig.(II.6). L'angle de pendule avec entrée rectangulaire.

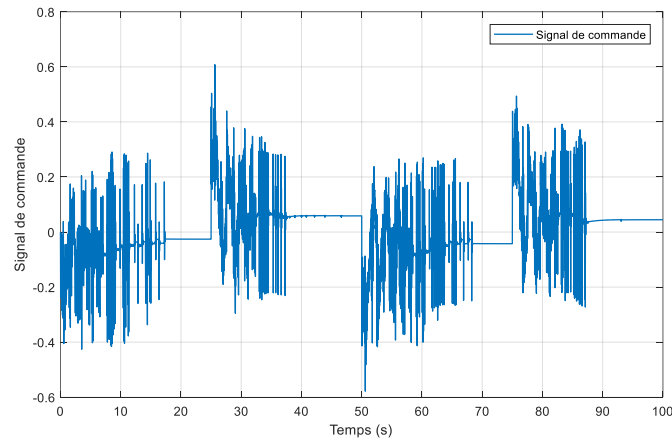


Fig.(II.7). Signal de commande.

II.3.2. Test de robustesse :

Le test de robustesse est effectué en appliquant une force externe sur le chariot ou le pendule. Les résultats montrent l'efficacité de cette robustesse :

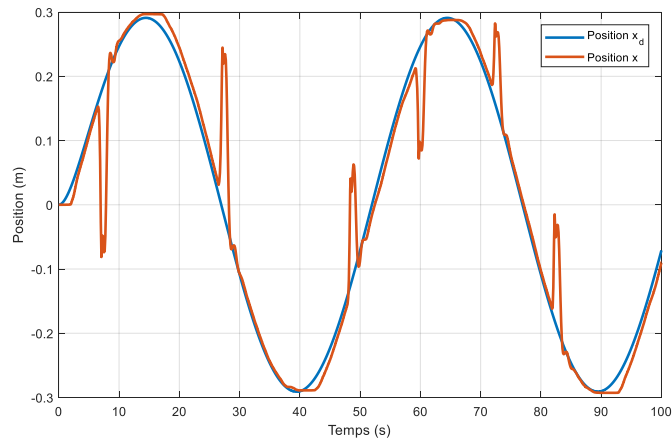


Fig.(II.8). La position de chariot avec entrée sinusoïdal.

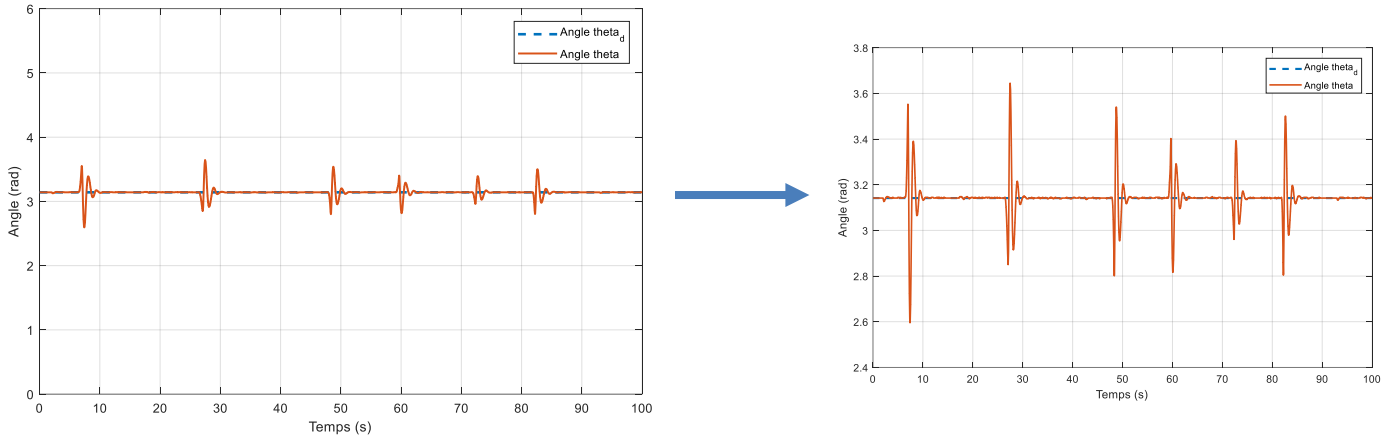


Fig.(II.9). L'angle de pendule avec entrée sinusoïdal.

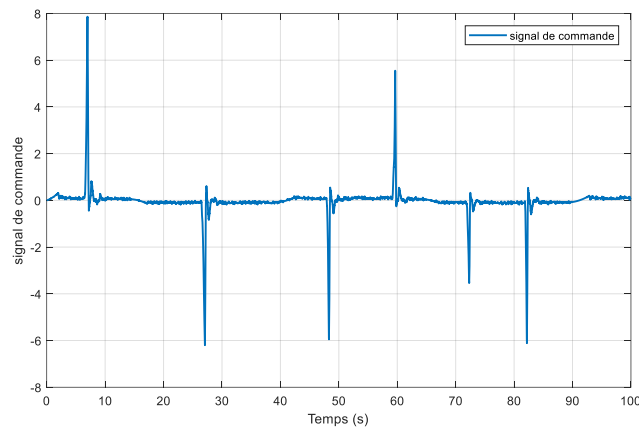


Fig.(II.10). Signal de commande.

II.4. Commande adaptative :

La commande adaptative est une méthode employée pour gérer les systèmes dont les paramètres sont incertains, qu'il s'agisse d'incertitudes structurées liées aux variations des paramètres du système ou d'incertitudes non structurées résultant des simplifications dans la modélisation de la dynamique du système. Cette approche repose sur le principe d'estimation en temps réel des paramètres afin d'ajuster la loi de commande en conséquence. Les paramètres du système sont estimés en temps réel pour calculer ceux du contrôleur. Une méthode directe, ou implicite, est également utilisée, dans laquelle les paramètres du contrôleur sont estimés en ligne. Ces paramètres sont ensuite employés pour paramétrer le système, en s'appuyant sur une relation étroite entre les paramètres du contrôleur et ceux du système. [14]. Il y a deux types de la commande adaptative :

- La commande adaptative à modèle de référence (MRAC).
- La commande auto-ajustable (STR).

La principale différence qui existe entre les deux approches réside dans la mode d'ajustement des paramètres du régulateur. De plus, les systèmes MRAC sont initialement développés pour les problèmes de poursuite en temps continu déterministe et la technique STR pour les problèmes de régulation discrète stochastique [9] [10].

Le principe d'un système de commande adaptative est représenté dans la Fig.(II.11).

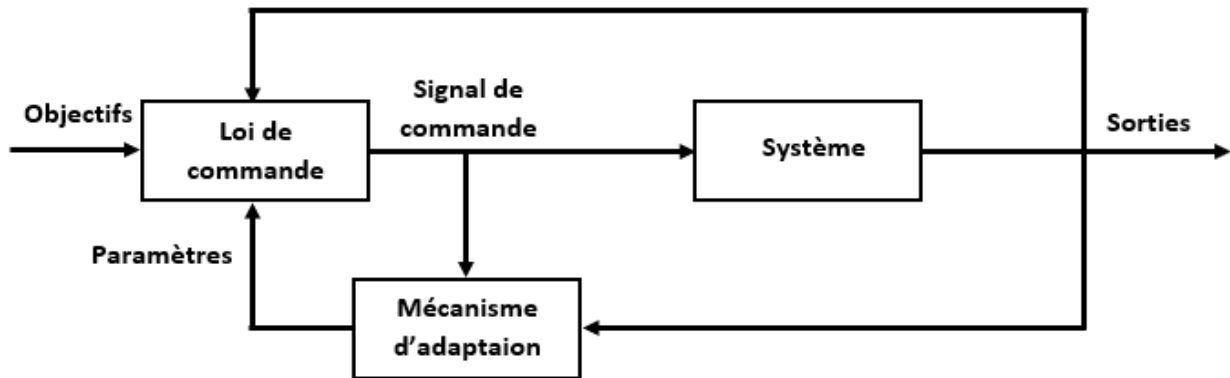


Fig.(II.11). Structure de base d'une commande adaptative [11].

II.4.1. Commande PID- adaptative d'un système pendule chariot :

Dans notre première étude du système pendule-chariot, nous avons utilisé une commande PID avec des gains fixes. Pour résoudre les limitations de cette approche, nous sommes passés à une commande PID adaptative, où les gains sont variables et s'adaptent dynamiquement aux conditions du système.

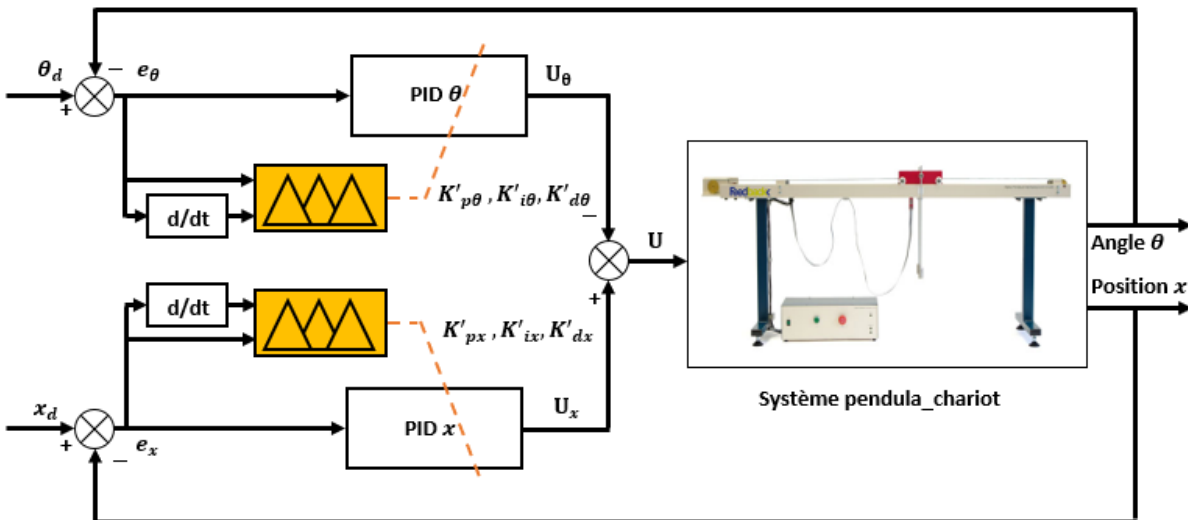


Fig.(II.12). Schéma fonctionnel de la commande PID adaptatif appliquée au système de pendule-chariot.

II.5. L'application de la Commande PID adaptatif :

II.5.1. Fonctions d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance des trois variables e , de et K , sont illustrées par les figures (II.13) , (II.14). Nous définissons des fonctions d'appartenance de forme trapézoïdale et triangulaire pour les entrées e et de , ainsi qu'une forme triangulaire pour la sortie K . Ces formes présentent de meilleures performances que les autres types de fonctions d'appartenance. Elles sont définies respectivement dans les plages $[-1,1]$, $[-1,1]$ et $[0,1]$ avec les variables linguistiques suivantes :

NB	Negative Big
NM	Negative Medium
NS	Negative Small
ZE	Zero Equal
PS	Positive Small
PM	Positive Medium
PB	Positive Big

Tableau (II.1). Les variables linguistiques d'entrées.

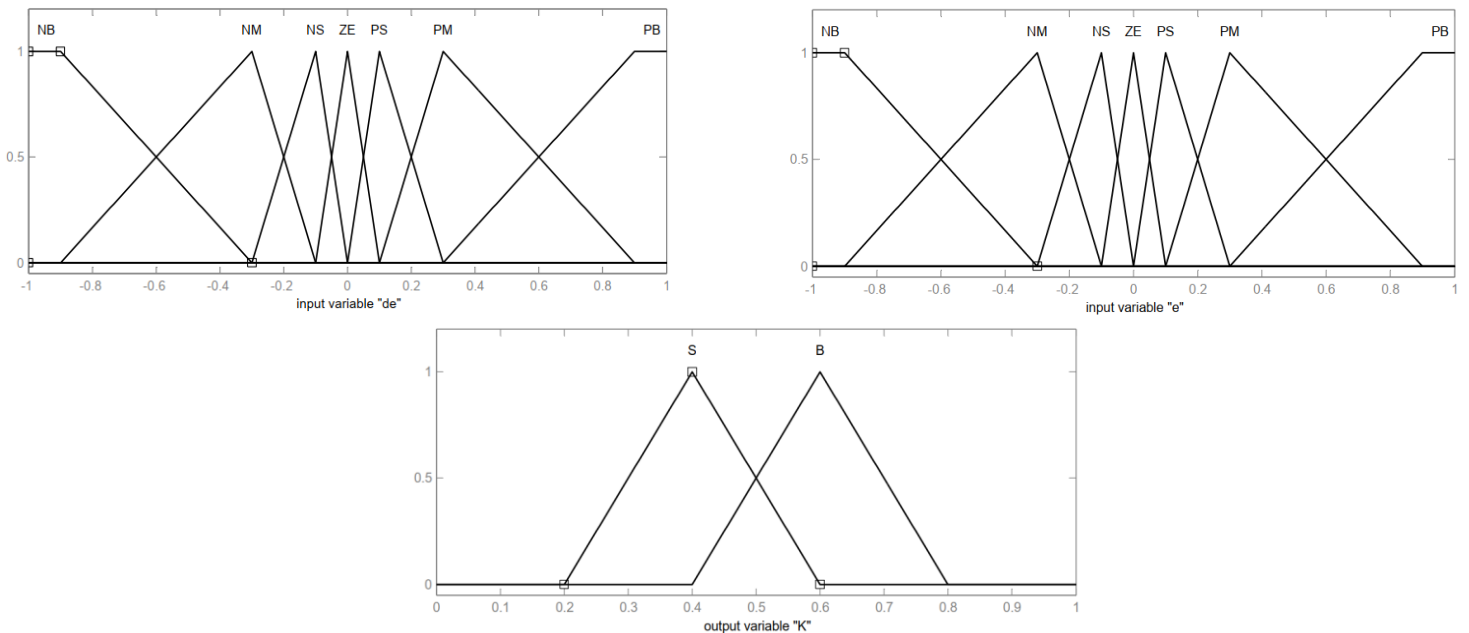


Fig.(II.13). Les fonctions d'appartenance des entrées e , de et des sorties K (K_p).

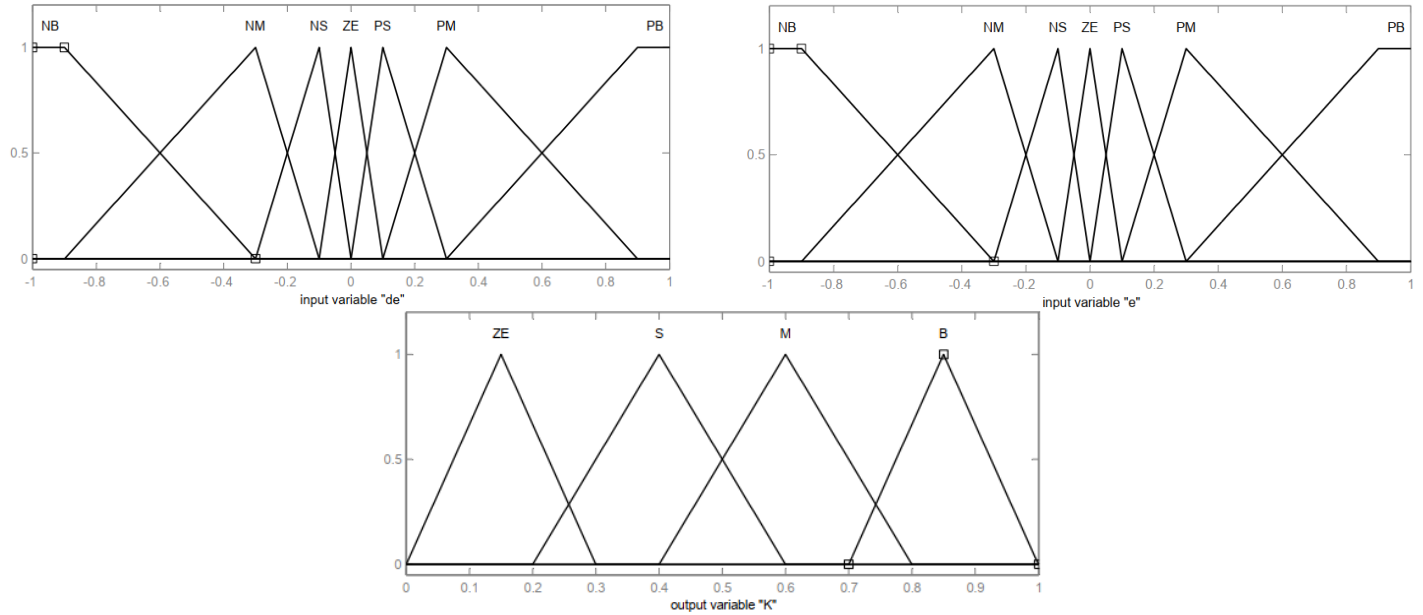


Fig.(II.14). Les fonctions d'appartenance des entrées e , de et des sorties K (K_i, K_d).

II.5.2. Table des règles floues :

Le tableau (II.2) présente la base de règles floues du superviseur :

K_p	e						
de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZE	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

K_i	e						
de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	M	M	B	B	B	M	M
NS	S	M	M	B	M	M	S
ZE	Z	S	M	B	M	S	Z
PS	S	M	M	B	M	M	S
PM	M	M	B	B	B	M	M
PB	B	B	B	B	B	B	B

K_d	e						
de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	M	M	B	B	B	M	M
NS	S	M	M	B	M	M	S
ZE	Z	S	M	B	M	S	Z
PS	S	M	M	B	M	M	S
PM	M	M	B	B	B	M	M
PB	B	B	B	B	B	B	B

Tableau (II.2). Les Règles d'inférence pour les gains K_p, K_i et K_d .

II.5.3 La surface de superviseur :

Les surfaces générées sont illustrées dans les figures ci-dessous :

Fig.(II.15). La surface de gain K_p .

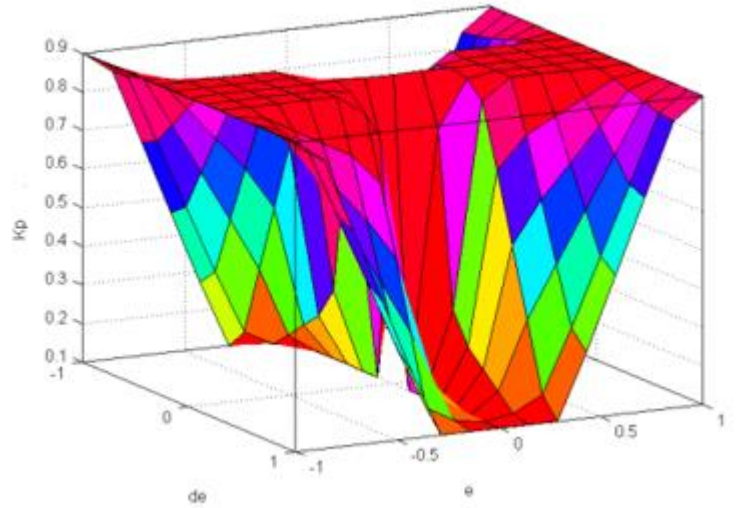


Fig.(II.16). La surface de gain K_i .

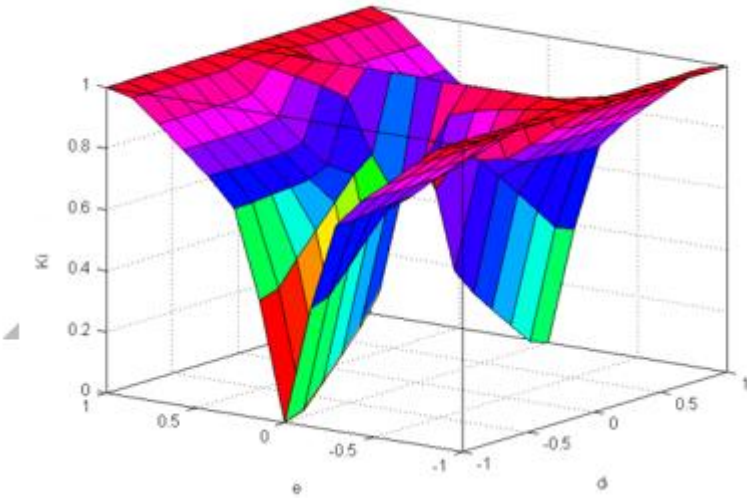
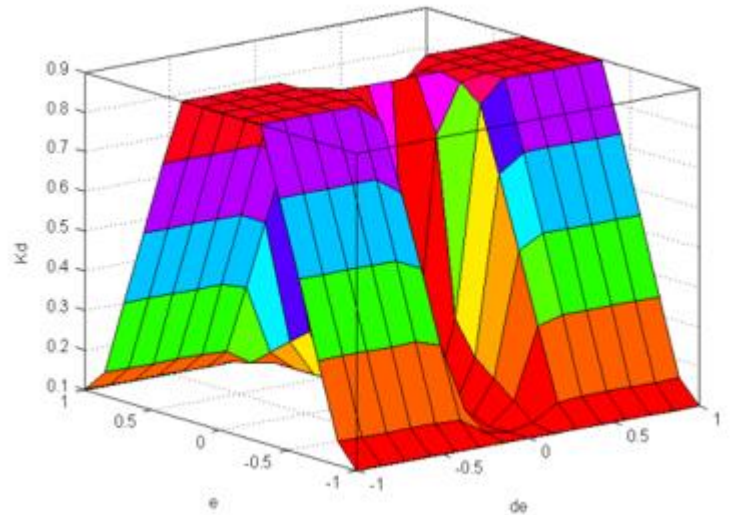


Fig.(II.17). La surface de gain K_d .



II.6. Résultats expérimentaux :

II.6.1 Test de poursuite de trajectoire :

Les gains d'un PID adaptatif varient constamment en fonction du système, comme le montrent les graphiques ci-dessous :

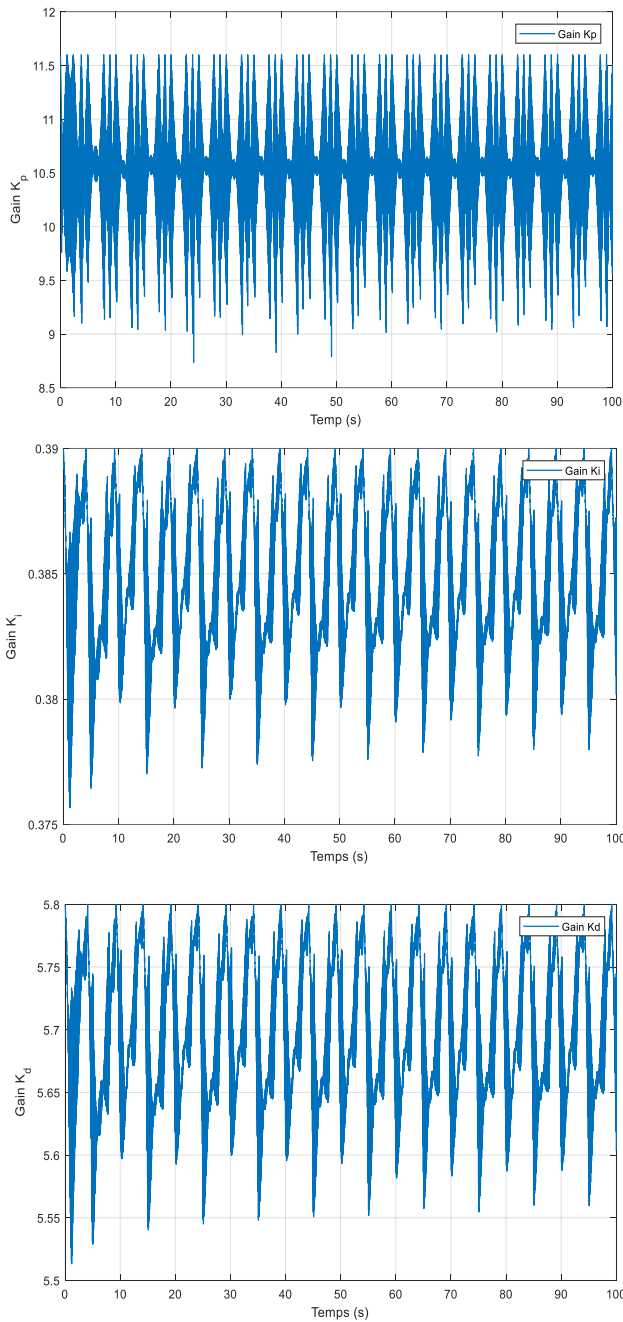


Fig.(II.18). La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de la position.

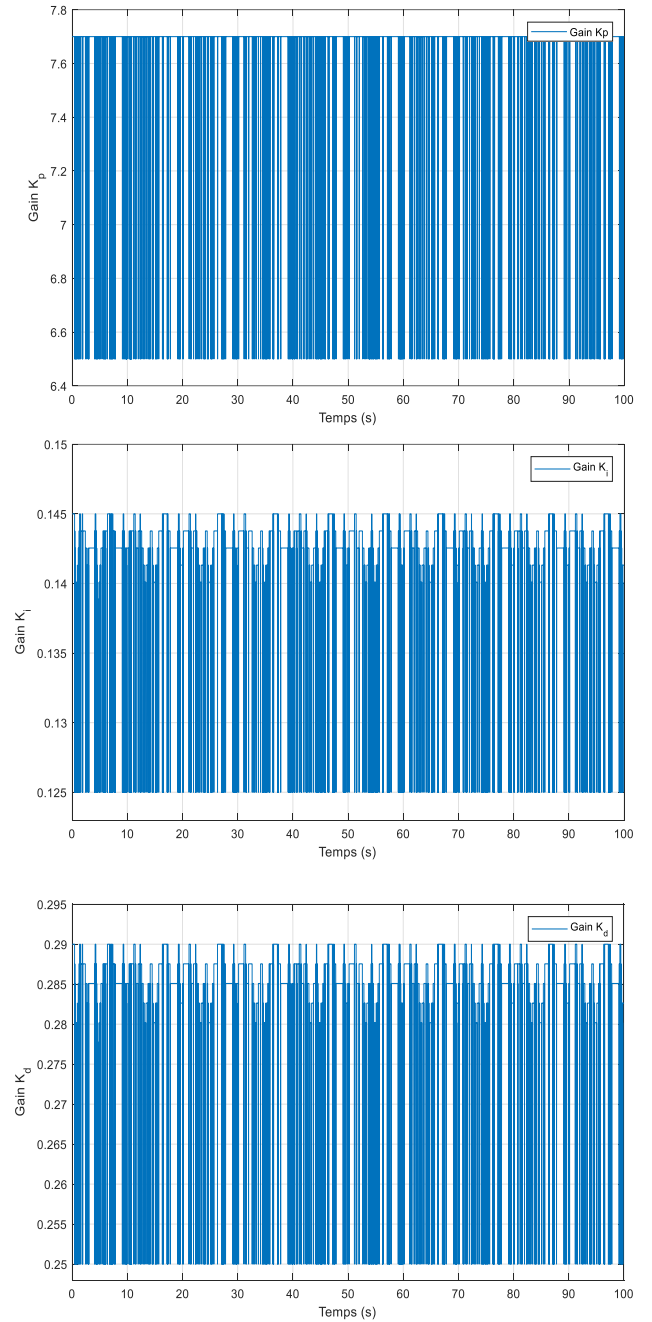


Fig.(II.19). La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de l'angle.

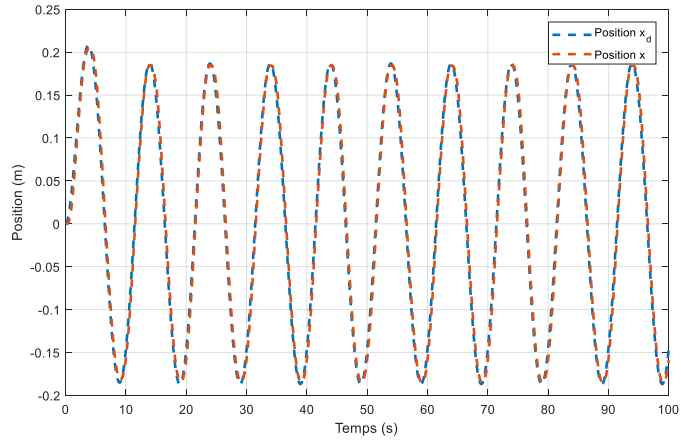


Fig.(II.20). La position de chariot avec entré sinusoidal.

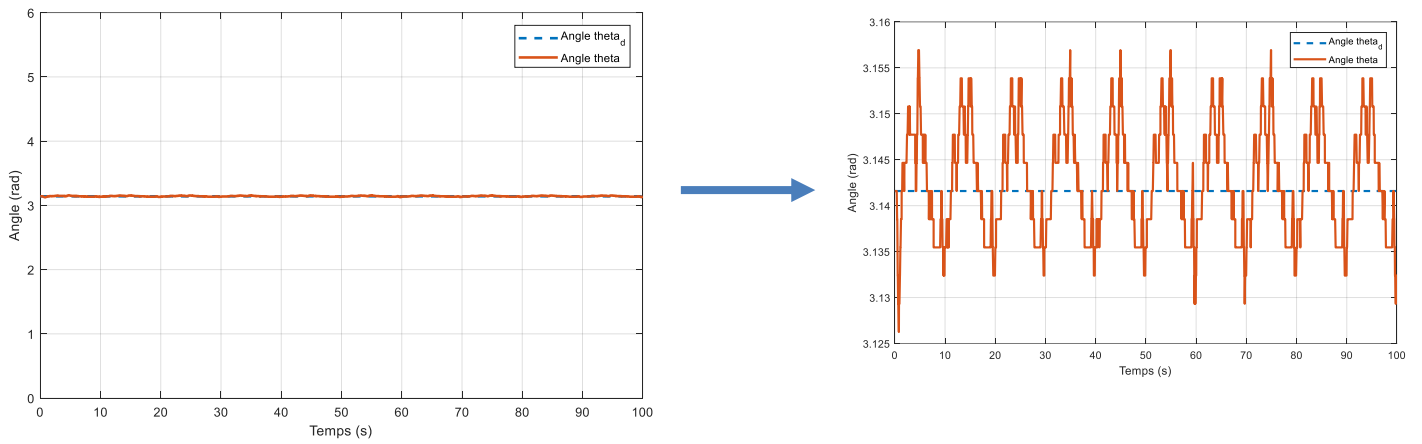


Fig.(II.21). L'angle de pendule avec entré sinusoidal.

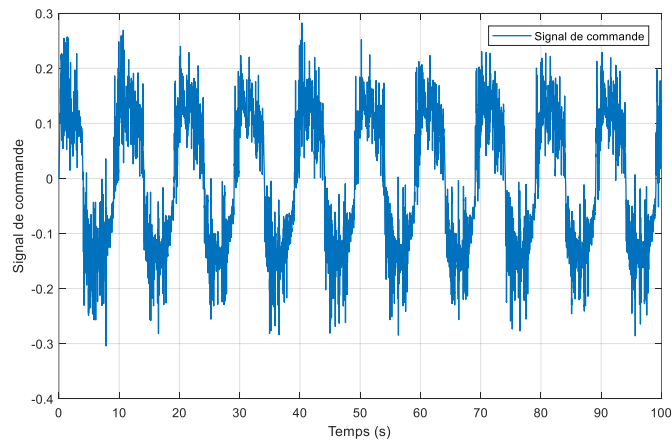


Fig.(II.22). Signal de commande.

La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ avec entré rectangulaire comme le montrent les graphiques ci-dessous :

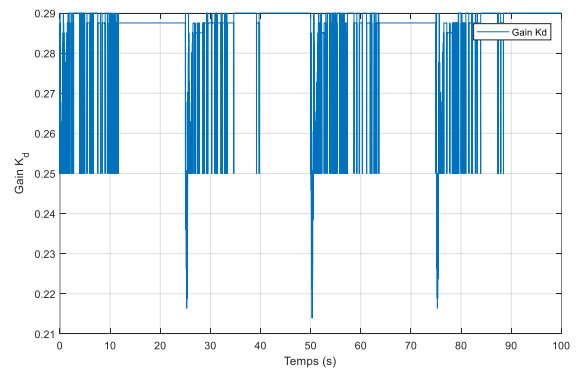
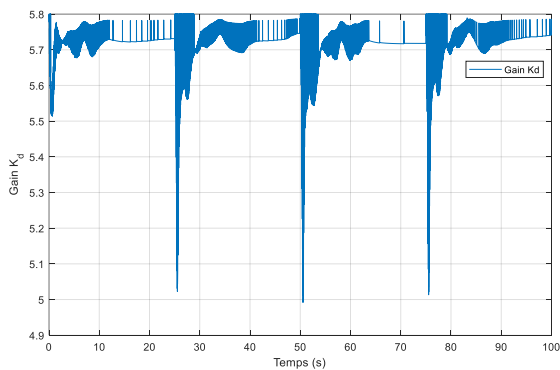
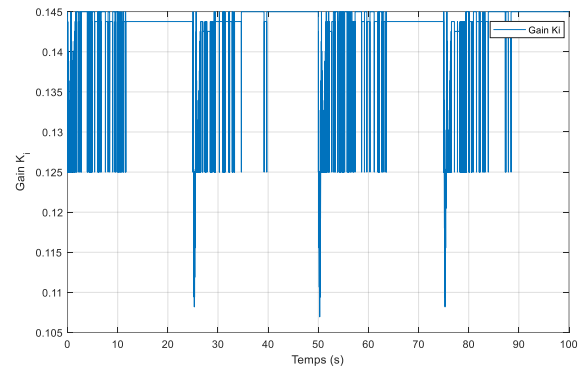
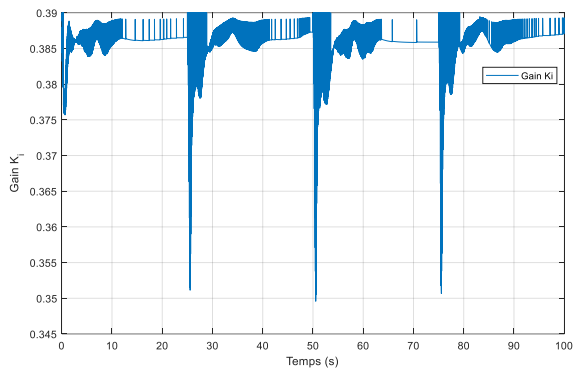
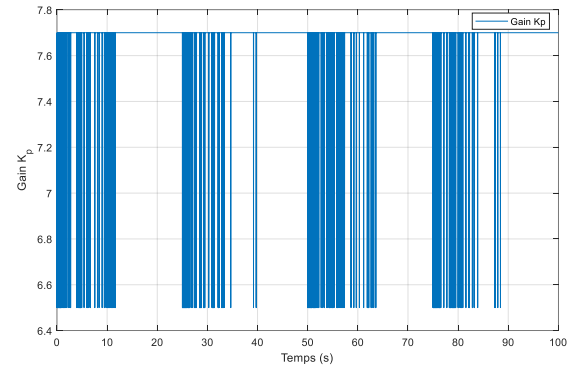
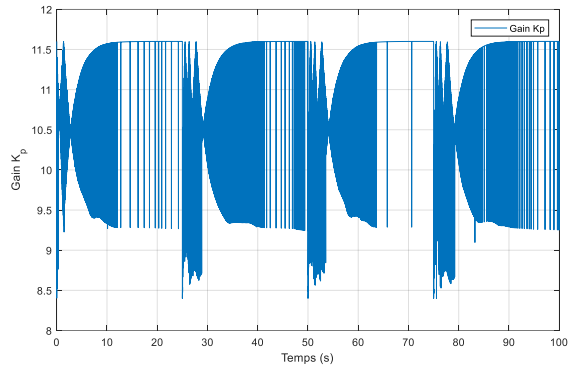


Fig.(II.23). La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de la position.

Fig.(II.24). La variation des gains $K_p, K_i, et K_d$ de l'angle.

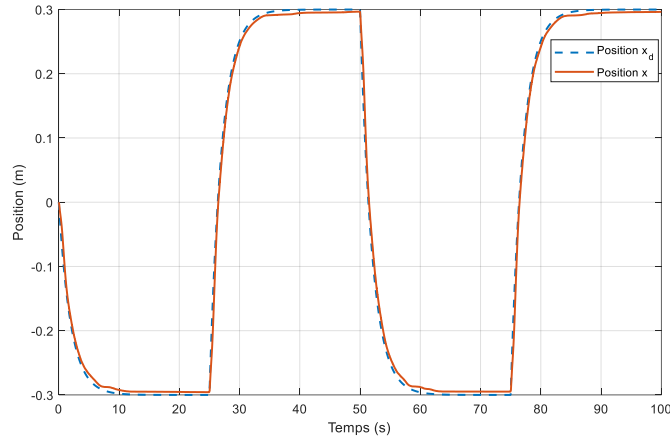


Fig.(II.25). La position de chariot avec entré rectangulaire.

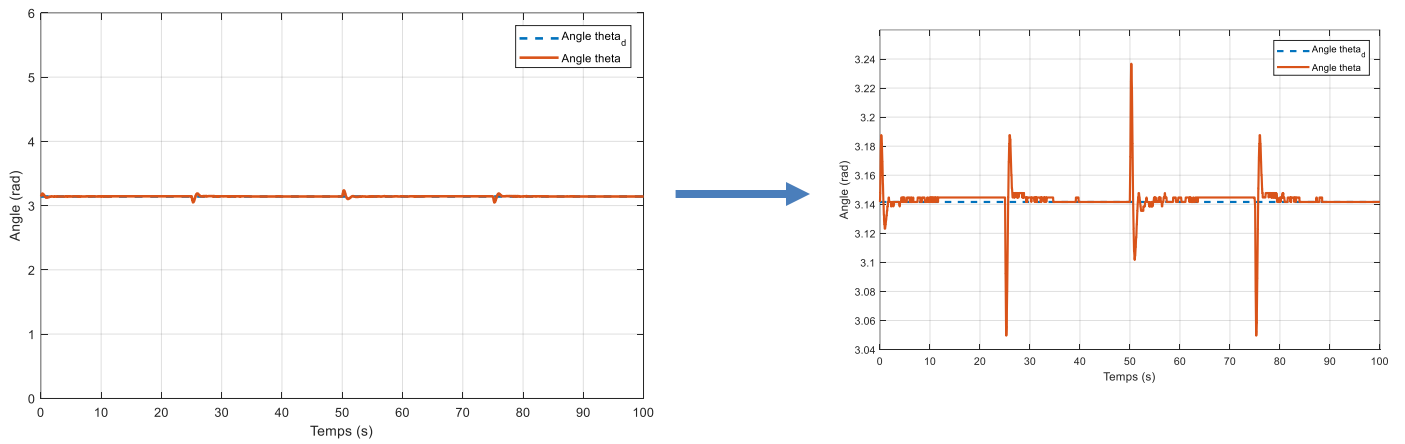


Fig.(II.26). L'angle de pendule avec entré rectangulaire.

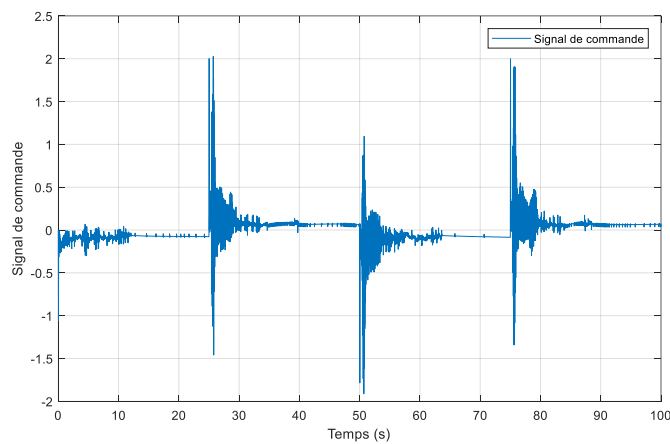


Fig.(II.27). Signal de commande.

II.6.2. Test de robustesse :

Nous allons appliquer le même test de robustesse sur la commande PID adaptatif dans les mêmes conditions, comme illustré dans les figures suivantes :

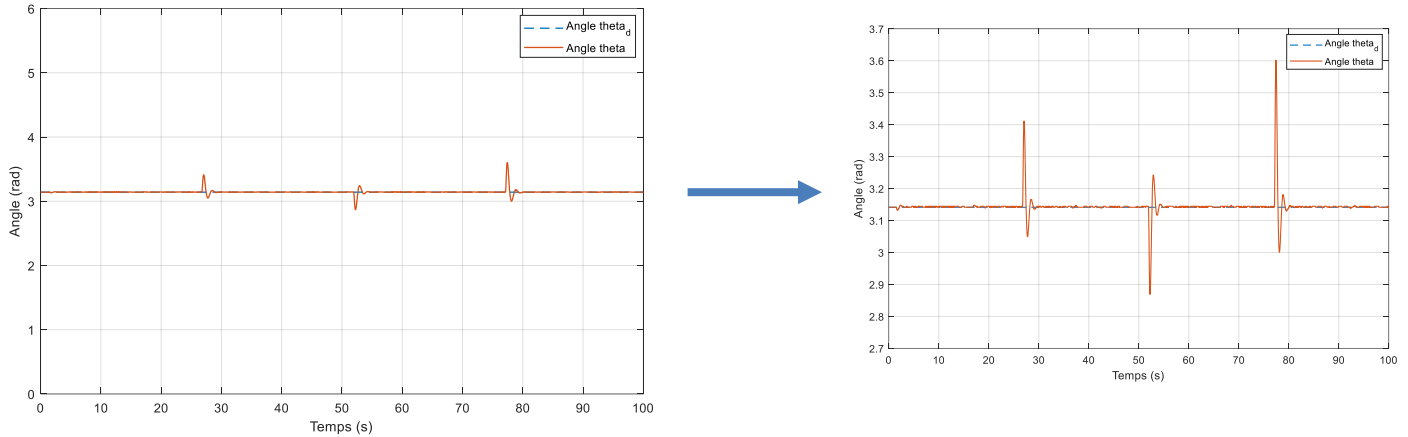


Fig.(II.28). L'angle de pendule avec entré sinusoidal.

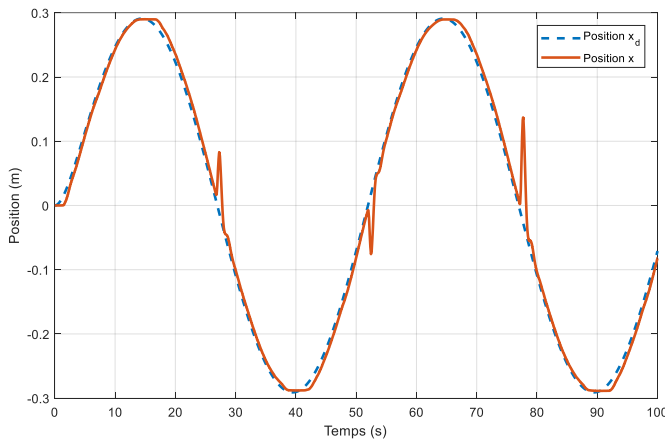


Fig.(II.29). La position de chariot avec entré sinusoidal.

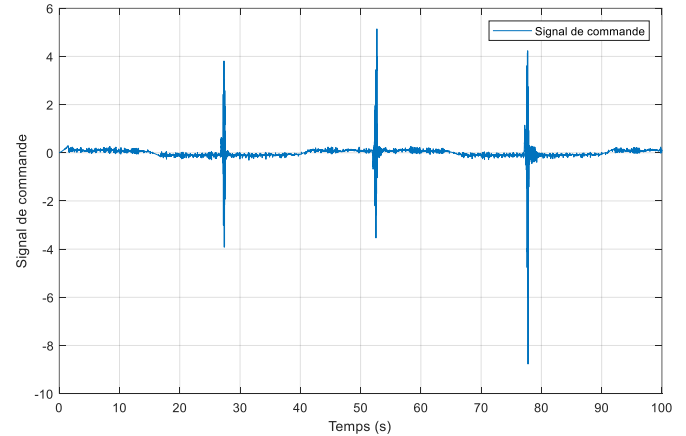


Fig.(II.30). Signal de commande.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement que les erreurs de poursuite sont faibles et que les dépassements restent dans des limites acceptables.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une régulation classique, et une commande hybride intelligente PID Adaptatif pour un système de chariot-pendule à deux degrés de liberté en présence des perturbations externes. Les performances réalisées, suite aux différents tests effectués, permettent de juger l'efficacité de la stratégie de commande PID optimisée par la logique floue, pour la prise en charge d'une commande précise et robuste du prototype de système chariot-pendule.

CHAPITRE-III

***COMMANDE MODE GLISSANT
AVEC SUPERVISEUR FLOU***

III.1. Introduction :

Le réglage par mode de glissement est une méthode particulière de fonctionnement des systèmes à structure variable, offrant des avantages significatifs tels que la garantie de stabilité et de robustesse face à de larges variations des paramètres du système. Cette approche, basée sur la théorie des systèmes à structure variable et les modes glissants associés, constitue une technique de commande non linéaire.

Une caractéristique essentielle de cette méthode est la présence de discontinuité dans la commande lors du passage par une surface de commutation, souvent désignée comme surface de glissement [12].

Cette méthode implique de faire commuter la trajectoire autour de cette surface à l'aide d'une commutation appropriée jusqu'à ce que le système atteigne un point d'équilibre, ce qui donne lieu au phénomène de glissement.

Dans notre travail, nous présentons aussi, dans ce chapitre, les éléments fondamentaux du formalisme de la commande à structure variable. Tout d'abord, nous expliquons brièvement le principe de cette commande, et ensuite le choix de la surface de glissement pour la commande d'un système chariot-pendule, Nous mettrons particulièrement l'accent sur la commande par mode glissant combinée avec un outil de commande basée sur l'intelligence artificielle, à savoir la logique floue. L'intérêt d'introduire la logique floue dans la commande à structure variable, une commande mode glissant adaptatif afin d'obtenir une commande robuste et lisse sur ce système. Enfin, une étude comparative entre les différentes lois de commandes proposées sera présentée.

III.2. Principe de la commande par mode de glissement :

La commande par mode glissant est une commande robuste qui se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée. Le contrôle généré par la commande par mode glissant est du type tout ou rien [13].

Dans ce type de commande, l'état du système définit l'état de commutation de l'organe de contrôle. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement, qui délimite deux sous espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande **Fig. (III.1)**. La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision.

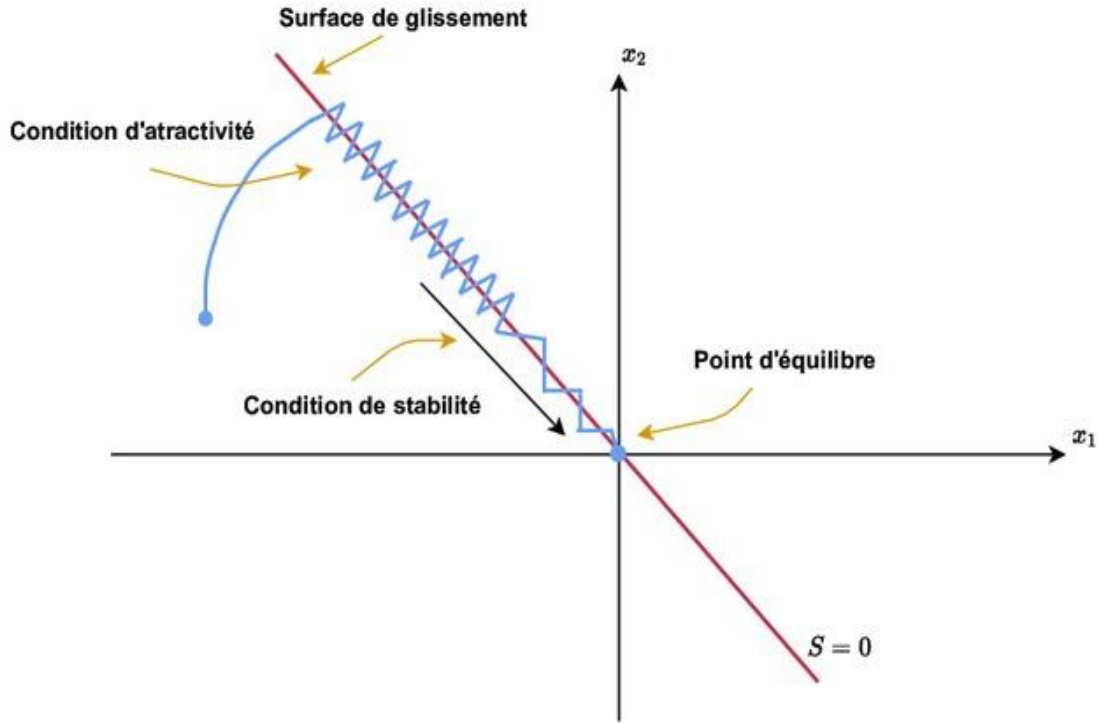


Fig.(III.1). Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

III.2.1. La commande décentralisée :

La commande décentralisée présente un certain nombre d'avantages [14][15], à savoir : la minimisation du nombre d'information traitées par les unités de commande, la simplicité des lois de commande élaborées par rapport au cas centralisé ainsi que l'amélioration de la fiabilité de transfert de données en n'utilisant que l'information locale. L'intérêt majeur de la décentralisation est la simplification de la synthèse et de l'implémentation des régulateurs. Chaque sous-système est commandé par une station de commande locale. Cette dernière n'utilise pas les informations des autres sous-systèmes [13].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)U_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x) + g_2(x)U_2 \end{cases} \quad (III.1)$$

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

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples : la haute précision, la simplicité, l'invariance, la robustesse, etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour les systèmes ayant un modèle imprécis [16]. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et des perturbations sur le modèle [17].

Malgré tous ses avantages, la commande en mode glissant présente un inconvénient majeur : le phénomène de « Chattering ».

III.3.1. Phénomène de « Chattering » :

Dans les applications pratiques du contrôle en mode glissant, les ingénieurs peuvent être confrontés à un phénomène indésirable d'oscillations ayant une fréquence finie et amplitude, appelée « Chattering ».

À la première étape du développement de la théorie du contrôle par mode glissant, « chattering » était le principal obstacle à sa mise en œuvre. « Chattering » est un phénomène néfaste car il conduit à une faible précision de contrôle, à un niveau élevé d'usure des pièces mécaniques en mouvement et pertes thermiques élevées dans les circuits de puissance. Il y a deux raisons qui conduisent à ce phénomène [18] :

- Le phénomène de « Chattering » peut être provoqué par des dynamiques rapides qui ont été négligées dans le modèle idéal. Ces dynamiques « non modélisées » avec de petites constantes de temps sont généralement ignorées dans les modèles de servomécanismes, de capteurs et de processeurs de données.
- La deuxième raison du broutage est l'utilisation de contrôleurs numériques avec un taux d'échantillonnage fini, ce qui provoque ce que l'on appelle un « discretization chatter ». Théoriquement, le mode glissant idéal implique une fréquence de commutation infinie. Étant donné que le contrôle est constant dans un intervalle d'échantillonnage, la fréquence de commutation ne peut pas dépasser celle de l'échantillonnage, ce qui entraîne également des vibrations.

III.3.2 Elimination du Phénomène de « Chattering » :

Diverses techniques ont été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Parmi celles-ci, la solution proposée par [19] consiste à approximer la commande discontinue par une fonction de saturation.

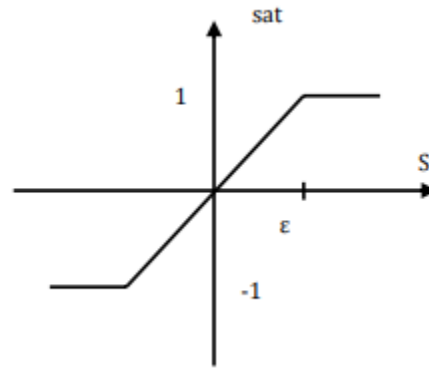


Fig.(III.2). Fonction SAT.

La fonction est respectivement définie par :

$$\mathit{sat}(S) = \begin{cases} -1 & \text{si } S < -\epsilon \\ \frac{S}{\epsilon} & \text{si } |S| < \epsilon \\ 1 & \text{si } S > \epsilon \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales et très dépendantes l'une de l'autre

- Choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande.

III.3.3. Choix de la surface de glissement :

Le système à régler peut-être défini par l'équation (III.1) :

$$\dot{x} = f(x, t)x + g(x, t)u \quad (\text{III.3})$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase.

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler x . Elle est donnée par [20] :

$$S(x) = \left(\frac{de(x)}{dt} + \lambda e(x) \right)^{r-1} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$e(x)$: C'est l'erreur.

λ : est une constante positive

r : Le degré relatif. Il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande [21].

III.3.4. Condition d'existence du mode de glissement (attractivité) :

L'étude de l'existence du mode de glissement est basée sur la deuxième méthode de Lyapunov dont une fonction définie positive est considérée comme suit :

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{III.5})$$

L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir attractivité. il faut que la fonction \dot{V} doit être défini négative :

$$\dot{V} = S\dot{S} < 0 \quad (\text{III.6})$$

Cette condition implique que les trajectoires du système tendent asymptotiquement vers la surface de glissement $S(t, x) = 0$ puis restent dans un voisinage de cette surface.

III.3.5. Détermination de la loi commande :

La commande est définie sous la forme suivante :

$$U = U_{eq} + U_{dis} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

U_{eq} : La commande équivalente.

U_{dis} : La commande discontinue.

Dans la première étape, nous déterminons le degré relatif r . Nous remarquons l'apparition de la commande dans la deuxième dérivée alors le degré relatif $r = 2$.

En remplaçons r dans l'équation (III.4) :

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (\text{III.8})$$

$$S = f(e_1, e_2)$$

$$\begin{cases} e_1 = x - x_d \\ e_2 = \theta - \theta_d \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

En dérivé l'équation (III.9) :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = x_2 - \dot{x}_d \\ \dot{e}_2 = x_4 - \dot{\theta}_d \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$$S_x = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1$$

$$S_x = x_2 - \dot{x}_d + \lambda_1 x_1 - \lambda_1 x_d \quad (\text{III.11})$$

En dérivé l'équation (III.11) :

$$\dot{S}_x = 0$$

$$S_x = \dot{x}_2 - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{x}_1 - \lambda_1 \dot{x}_d$$

$$f_1 + g_1 U_{eqx} - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{x}_1 - \lambda_1 \dot{x}_d = 0 \quad (\text{III.12})$$

$$U_{eqx} = -\frac{1}{g_1} (f_1 - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{x}_1 - \lambda_1 \dot{x}_d) \quad (\text{III.13})$$

$$U_{disx} = -K_x \text{sat}(S_x) \quad (\text{III.14})$$

$$S_\theta = \dot{e}_2 + \lambda_2 e_2$$

$$S_\theta = x_4 - \dot{\theta}_d + \lambda_2 x_3 - \lambda_2 \theta_d \quad (\text{III.15})$$

En dérivé l'équation (III.15) :

$$\dot{S}_\theta = 0$$

$$S_\theta = \dot{x}_4 - \ddot{\theta}_d + \lambda_2 \dot{x}_3 - \lambda_2 \dot{\theta}_d$$

$$f_2 + g_2 U_{eq\theta} - \ddot{\theta}_d + \lambda_2 \dot{x}_3 - \lambda_2 \dot{\theta}_d = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$U_{eq\theta} = -\frac{1}{g_2} (f_2 - \ddot{\theta}_d + \lambda_2 \dot{x}_3 - \lambda_2 \dot{\theta}_d) \tag{III.17}$$

$$U_{dis\theta} = -K_\theta sat(S_\theta) \tag{III.18}$$

$$U = \begin{cases} U_{eqx} + U_{disx} \\ U_{eq\theta} + U_{dis\theta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -\frac{1}{g_1} (f_1 - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{x}_1 - \lambda_1 \dot{x}_d) - K_x sat(S_x) \\ -\frac{1}{g_2} (f_2 - \ddot{\theta}_d + \lambda_2 \dot{x}_3 - \lambda_2 \dot{\theta}_d) - K_\theta sat(S_\theta) \end{cases} \tag{III.19}$$

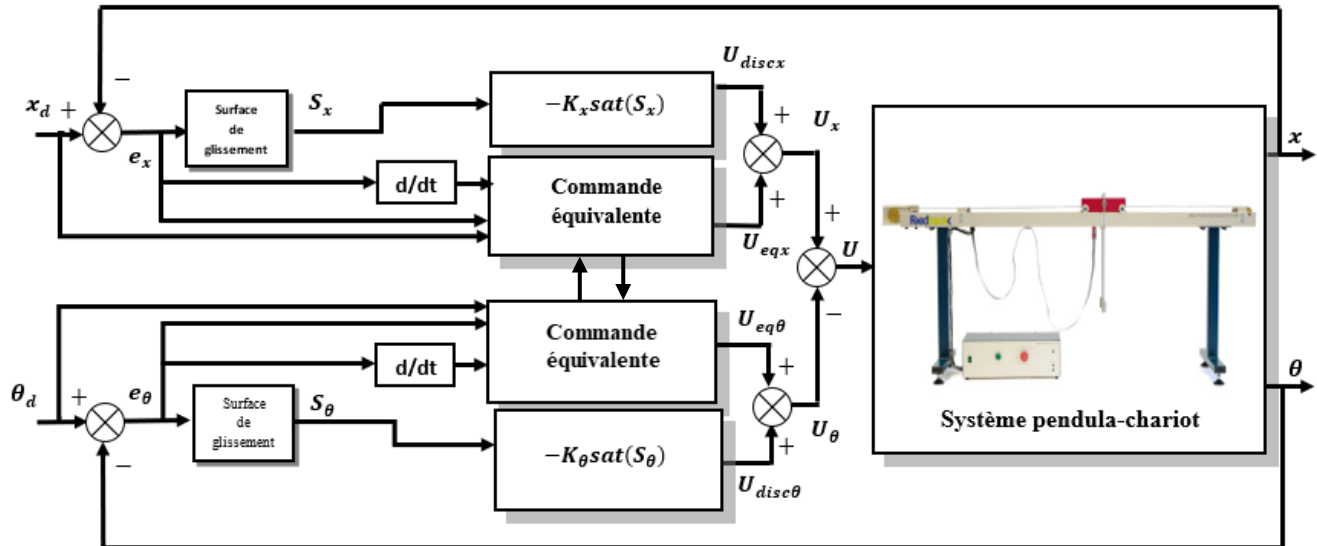


Fig.(III.3). Schéma bloc de la commande par mode glissant appliquée au système de chariot-pendule.

III.4. Résultats expérimentaux :

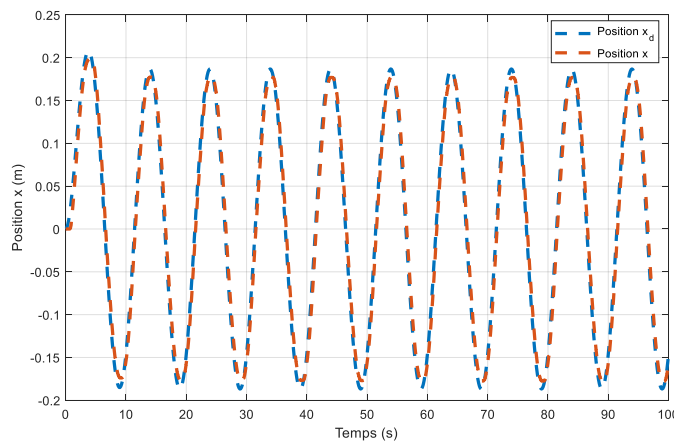


Fig.(III.4). La position du chariot avec entrée sinusoïdal.

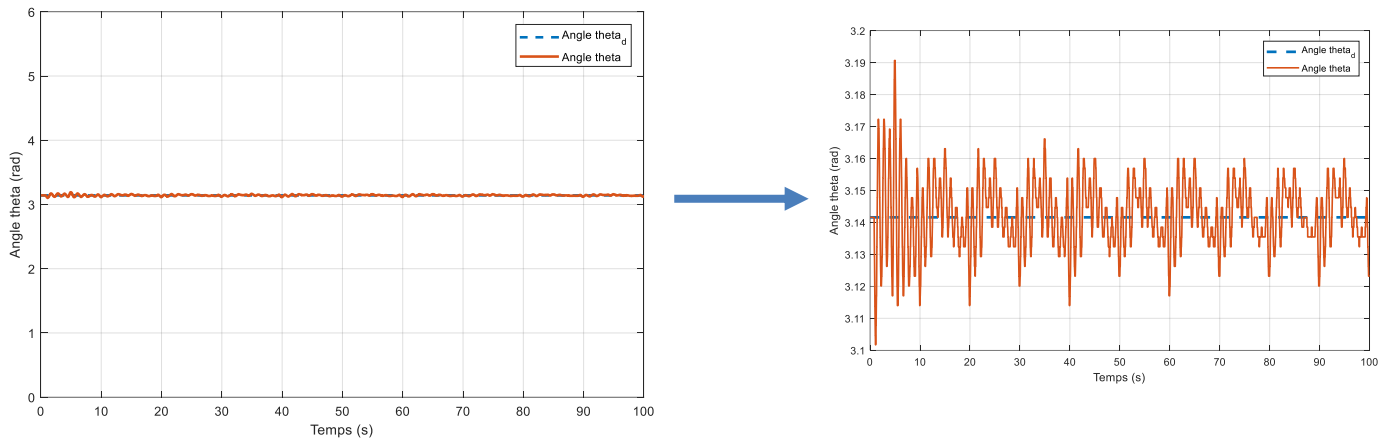


Fig.(III.5). L'angle de pendule avec entrée sinusoidal.

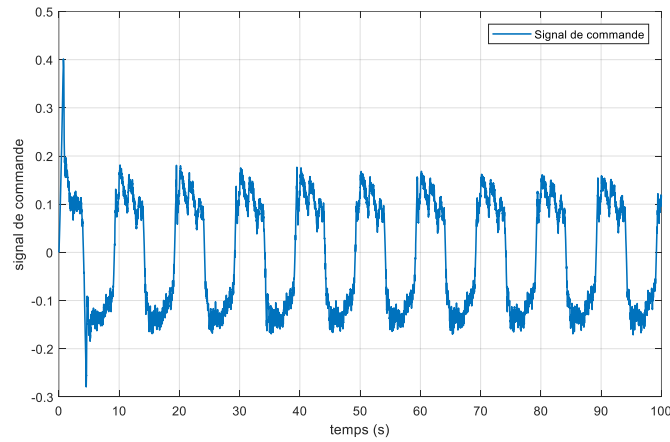


Fig.(III.6). Signal de commande.

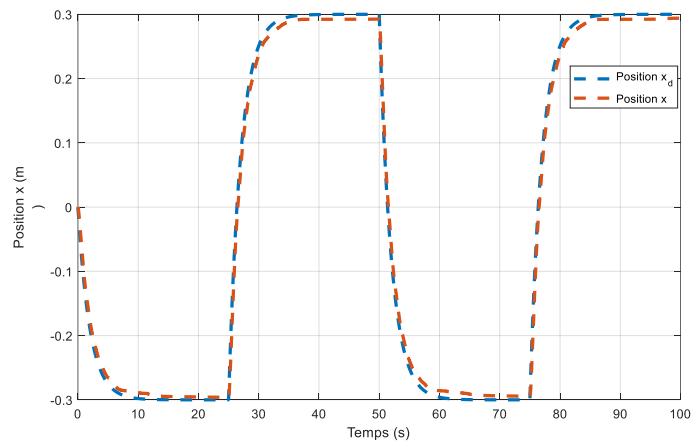


Fig.(III.7). La position du chariot avec entrée rectangulaire.

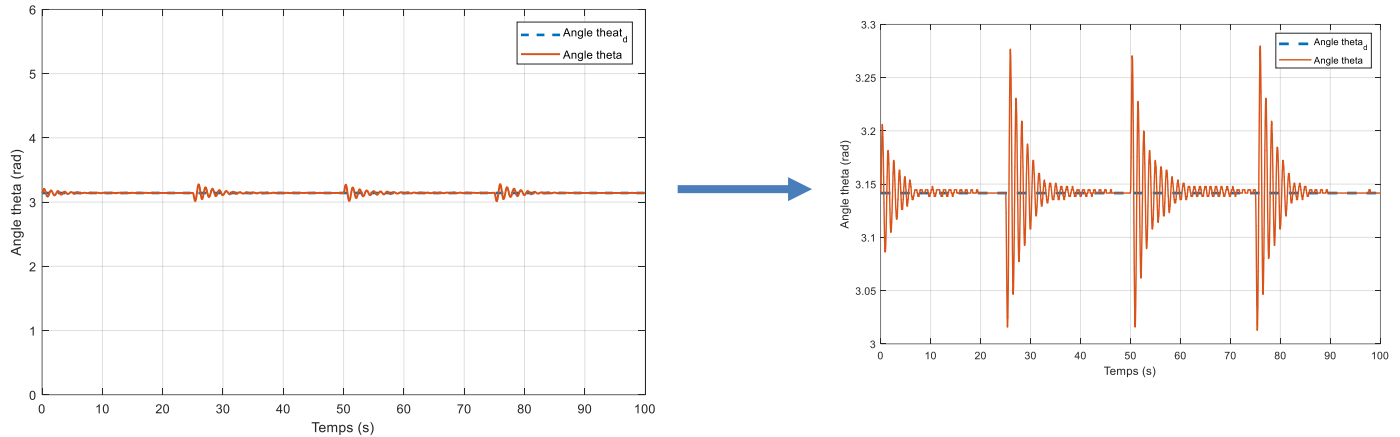


Fig.(III.8). L'angle du pendule avec entrée rectangulaire.

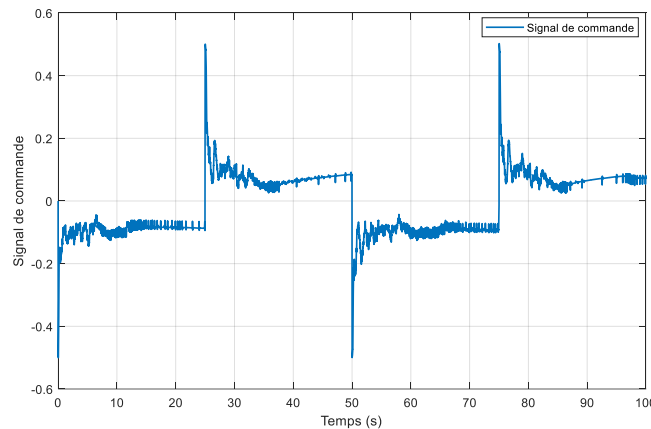


Fig.(III.9). Signal de commande.

III.5. L'application de la Commande par mode glissant adaptative :

Dans la partie précédente, on a supposé que le gain K_j de la commande par mode glissant peut-être déterminé. Cependant, en pratique, on n'a pas une méthode qui permet le calcul de ce gain. Pour résoudre ce problème, on a utilisé dans cette section, une commande à gain adaptatif optimisé par la logique floue. Cette stratégie de réglage proposée contient des opérations de connaissance sous la forme de règles « SI-ALORS » qui décident des valeurs des gains K_j de commande en fonction de la condition de fonctionnement simultané du système à commander. Les règles du superviseur flou sont développées en fonction de l'erreur et sa variation pour faire une adaptation du gain K_j à chaque pas d'échantillonnage [22]. Cette approche permet de faire converger la commande attractive vers la commande attractive optimale. Pour se faire nous proposons un schéma de superviseur donné par la Fig. (III.10).

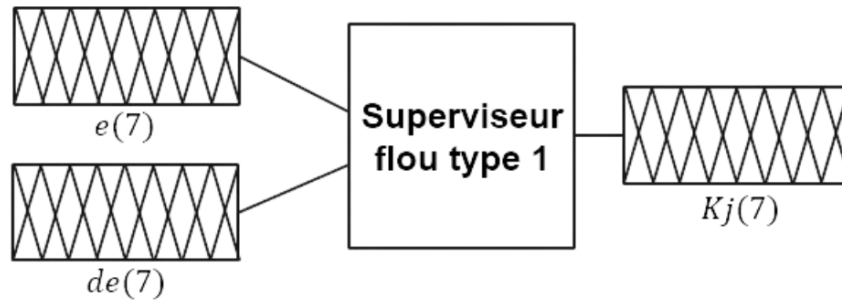


Fig (III.10). Contrôleur flou type-1 de supervision [22]

III.5.1. Fonctions d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance des trois variables e , de et Kj sont représentées dans la figure (III.10) Pour les entrées e et de , nous utilisons des fonctions d'appartenance de forme gaussienne, tandis que pour la sortie Kj , nous optons pour des fonctions d'appartenance triangulaires. Ces choix offrent de meilleures performances par rapport à d'autres types de fonctions d'appartenance. Les plages définies pour ces fonctions sont respectivement $[-1,1]$ pour e , $[-1,1]$ pour de , et $[0,1]$ pour Kj , avec les variables linguistiques suivantes :

(e ; de)

NB	Negative Big
NM	Negative Medium
NS	Negative Small
ZE	Zero Equal
PS	Positive Small
PM	Positive Medium
PB	Positive Big

(Kj)

VVS	Very Very Small
VS	Very Small
S	Small
M	Medium
B	Big
VB	Very Big
VVB	Very Very Big

Tableau. (III.1). Les différents termes linguistiques des variables d'entrées et de sortie [23]

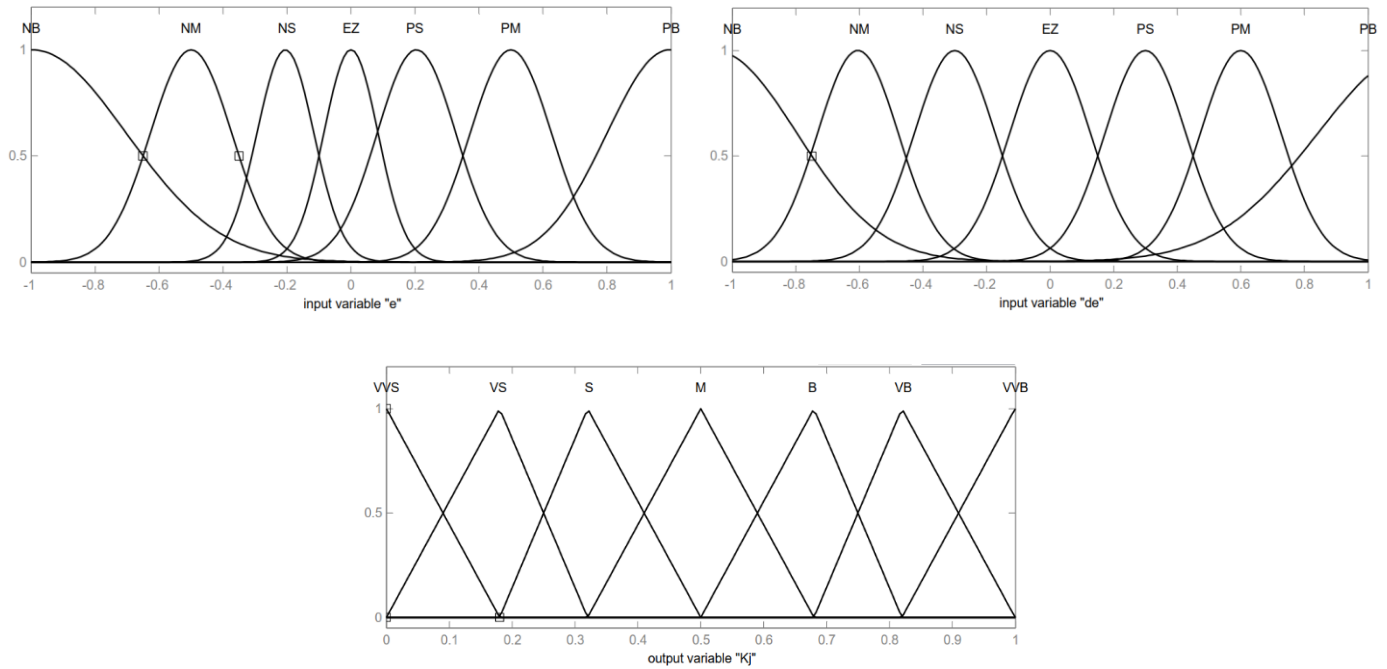


Fig.(III.11). Les fonctions d'appartenances pour les entrées (*e* et *de*) et la sortie *K_j*.

III.5.2 Table des règles floues :

Le tableau (III.2) présente la base de règles floues du superviseur :

<i>K_j</i>	<i>e</i>						
<i>de</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	M	S	VS	VVS	VS	S	M
<i>NM</i>	B	M	S	VS	S	M	B
<i>NS</i>	VB	B	M	S	M	B	VB
<i>ZE</i>	VVB	VB	B	M	B	VB	VVB
<i>PS</i>	VB	B	M	S	M	B	VB
<i>PM</i>	B	M	S	VS	S	M	B
<i>PB</i>	M	S	VS	VVS	VS	S	M

Tableau (III.2) Règle d'inférence pour le superviseur du contrôleur MGA. [24].

III.5.3 La surface de superviseur :

La surface générée est illustrée dans la figure :

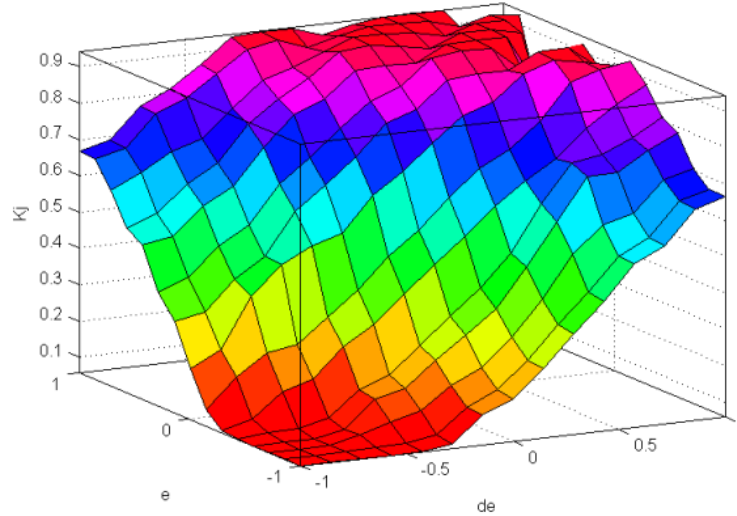


Fig.(III.12). La surface de superviseur.

Afin d'éliminer le phénomène de 'Chattering' et optimiser le gain de commutation k_i en utilisant le système d'inférence flou, la structure générale proposée de la commande par mode glissant adaptatif est illustrée dans la figure (III.13).

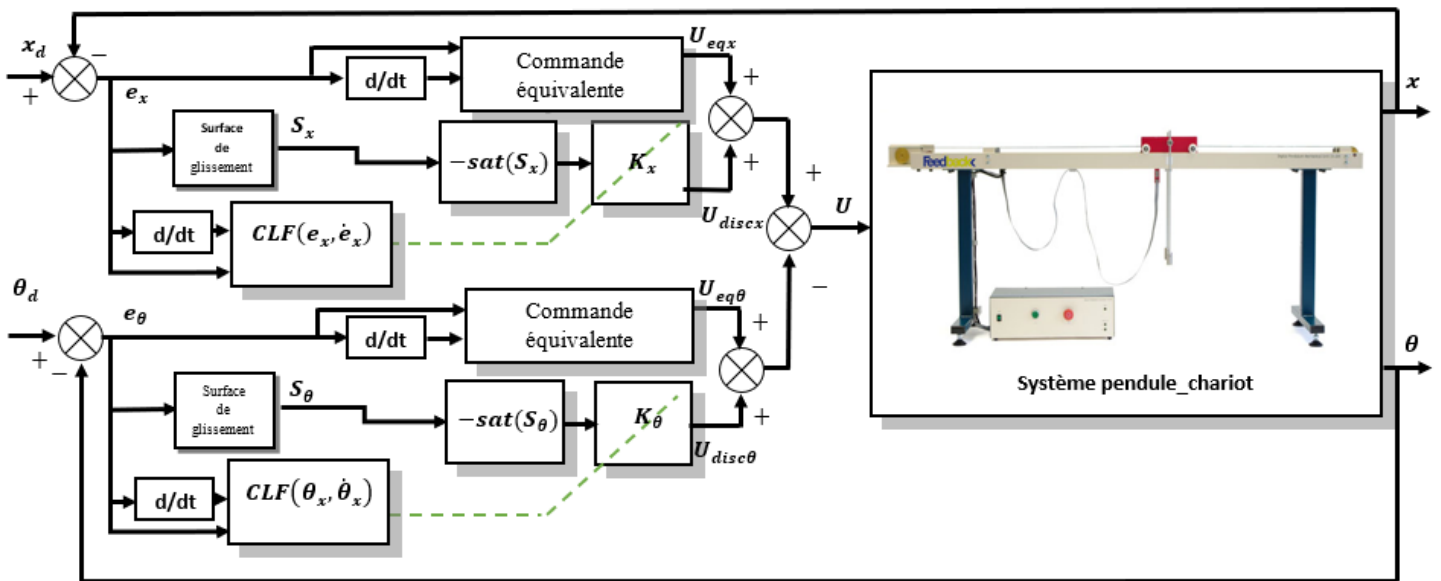


Fig.(III.13). Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant avec gain adaptatif appliquée au système de chariot-pendule.

III.6. Résultats expérimentaux :

Le gain d'un mode glissant varie constamment en fonction du système, comme le montrent les graphiques ci-dessous :

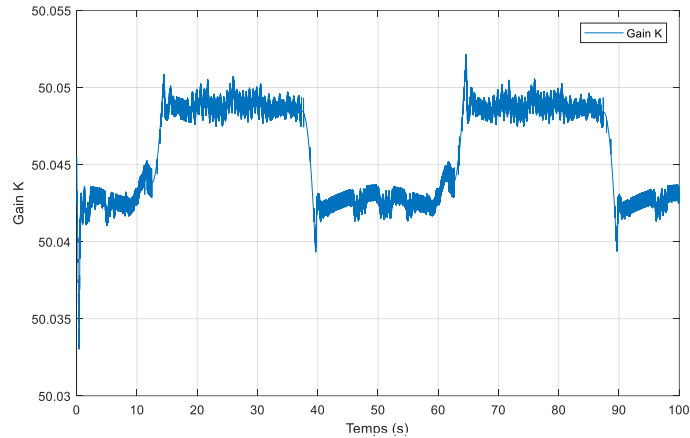


Fig.(III.14). La variation de gain K.

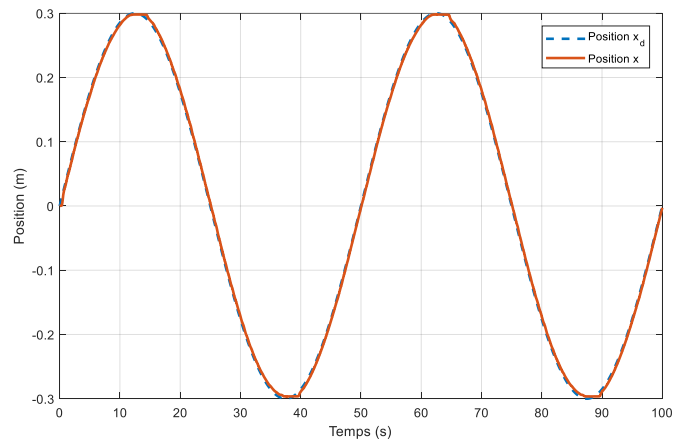


Fig.(III.15). La position de chariot avec entrée sinusoïdale.

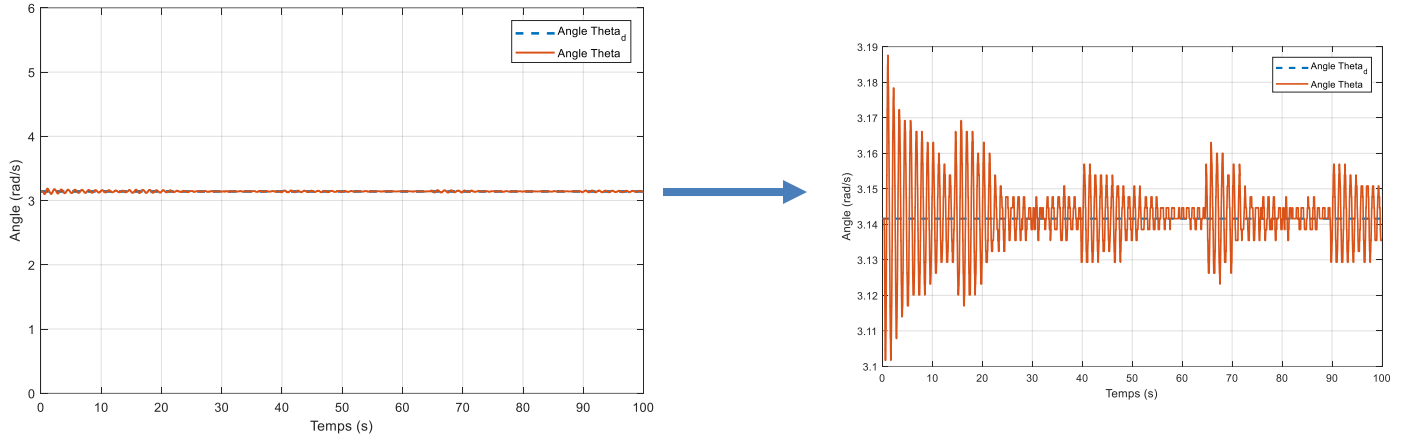


Fig.(III.16) L'angle de pendule avec entré sinusoïdal.

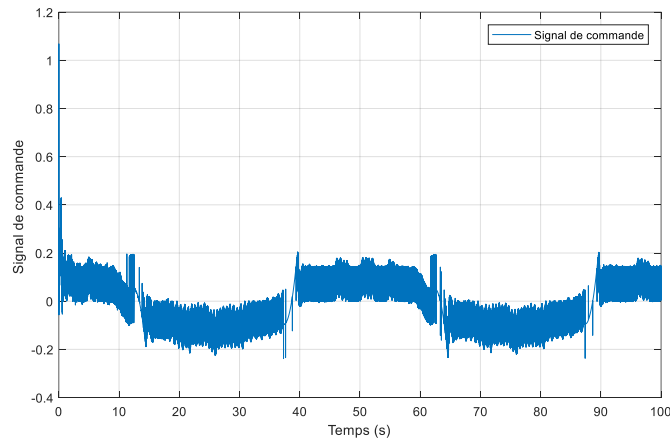


Fig.(III.17). Signal de commande.

III.7. Interprétation :

Les résultats expérimentaux montrent clairement que les erreurs de poursuite sont minimales et que les dépassements restent dans des limites acceptables. Les oscillations régulières et bien contrôlées de la position du chariot montrent une bonne correspondance avec le mouvement prévu. La variation angulaire restreinte de l'angle du pendule indique une stabilisation efficace autour de la position d'équilibre. De plus, le signal de commande demeure dans une plage acceptable et affiche une forme relativement lisse, ce qui améliore la précision globale du système.

III.8. Etude Comparative :

Cette étude vise à évaluer les performances des diverses stratégies des lois de commande développées pour la commande d'un pendule chariot. L'analyse repose sur les deux critères suivants :

- l'énergie de la commande : $A_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (\mathbf{u}^T \mathbf{u})$

- la somme des carrés des erreurs : $A_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (\mathbf{e}^T \mathbf{e})$

Critère	A_1			
Commande	PID	PIDA	MG	MGA
Energie	1.0381e+04	1.0638e+04	8.6670e+03	8.6643e+03
Critère	A_2			
Commande / Erreur	PID	PIDA	MG	MGA
e_θ	15.4103	5.0659	30.0430	24.0935
e_x	147.5788	49.7288	24.8961	30.0459

Tableau. (III.3). Comparaison quantitative entre les commandes développées pour le système pendule-chariot.

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nos résultats expérimentaux montrent que la commande par mode glissant pour le système chariot –pendule à degrés de liberté sont très satisfaisants pour la stabilisation et la poursuite de trajectoires, cette loi de commande intègre des paramètres adaptatifs pour compenser les variations paramétriques, est également éliminé sans dégradation de la robustesse du système. En outre, l'étude comparative avec les lois de commande appliquées a montrent l'efficacité de l'approche de la commande (CMG) à gain adaptative.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour le système chariot pendule nous avons utilisé le modèle dynamique délivré par la société feedback. Ce système, étant un système non linéaire fortement couplé, complexe, multi-variable d'entrées/sorties, son asservissement nécessite l'emploi d'une technique de commande à la fois puissante et facile à implémenter telle que la commande PID. Notre objectif est le passage à la commande PID adaptatif qui permet d'améliorer les résultats obtenus par le régulateur classique PID surtout lors des grandes variations de consigne et de perturbations extérieures. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que la commande PID adaptatif appliquée assure une meilleure robustesse.

Des méthodes de commande par mode glissant ont été développées et pour lesquelles des surfaces de glissement linéaires ont été proposées. L'autre direction que nous avons suivie, pour améliorer les performances de cette technique de commande, est celle qui consiste à associer la commande floue et la commande par mode de glissement.

Les résultats obtenus ont montré le bon fonctionnement des lois de commande développées à travers les performances enregistrées, aussi bien pour les expérimentations en temps réel effectuées sur le modèle de chariot-pendule autrement dit la grue à conteneurs.

A l'issue de ces travaux, ce mémoire ouvre de nouvelles perspectives de recherche parmi lesquelles nous citons :

- Généralisation de l'étude des lois de commande proposées pour le cas discret.
- Utilisation des algorithmes d'optimisation pour la détermination des différents paramètres de la loi de commande.
- Validation des commandes proposées sur d'autres système.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Feedback Instrument**, “Pendulum-Cart System - User’s Manual 33-005-PCI”.
- [2] **A.Z. Al-Garni, K.A.F. Moustafa and S.S.A.K. Javeed Nizami**, “ Optimal control of overhead cranes ”, Elsevier Science Ltd, Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 9, pp. 127-1284, 1995
- [3] **Le Anh Tuan, Gook-Hwan Kim, and Soon-Geul Lee**, “ Partial Feedback Linearization Control of the Three Dimensional Overhead Crane ”, 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering August 20-24, Seoul, Korea, 2012
- [4] **F. Mudry**, « Note d’application, Modélisation et régulation d’un pendule inversé », école d’ingénieur de Canton de Vaud.
- [5] **S. Olaru**, « Contribution A L’étude De La Commande Prédictive Sous Contraintes Par Approche Géométrique », Thèse De Doctorat, Université Paris Xi Orsay, France, 2005.
- [6] **Ferhat Lahouazi**, « mise en œuvre d’une stratégie de commande neuro floue : application à un pendule inversé» , mémoire de magister, 2011.
- [7] **J.Aström**, « Control system design », Chapter 6, PID control, university of Santa Barbara Ed. 2002.
- [8] **Åstrom J, Hägglund T**, « PID Controllers: Theory, Design, and Tuning», 2nd Edition. USA: Instrument Society of America; 1995.
- [9] **A.Nait Seghir**, « Contribution à la commande adaptative et neuronale d’une machine synchrone a aimants permanents », thèse de doctorat, école nationale polytechnique, Algérie, 2007.
- [10] **S.Meziane** , « Commande adaptative et prédictive de la machine asynchrone», thèse de doctorat, université de Constantine, 2009.
- [11] **M. Z. Ghellab,S. Zeglache et A. Bouguerra**, «Real time implementation of fuzzy gain-scheduled PID controller for twin rotor MIMO system TRMS », Advances in Modelling and Analysis C, Vol. 73, No. 4, pp.137-149, December, 2018
- [12] **V. I. Utkin**, « Discontinuous control system: State of art in theory and application ».
- [13] **A.L. Nemmour**, « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Magister, Université de Batna en 2001.

- [14] **S. Jain, F. Khorrami** et **B. Fardanesh**, « Decentralized control of largescale power systems with unknown interconnections », *Int. J. Control*, 63, pp. 591-608, 1996.
- [15] **D.T. Gavel** et **T. C.Hsia**, « Decentralized adaptive control of robot manipulators », In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh,NC, pp. 1230-1235, 1987.
- [16] **W.Gao,J.C.Hung**,« Variable structure control system »,*IEEE.Trans.Indust.Applic.* Vol.40,N°.1,pp45-55,1993.
- [17] **I. J. Slotine**, « Applied nonlinear control », Englewood Cliffs,NJ. Prentice
- [18] **Vadim Utkin**, « Chattering problem in sliding mode control systems », The Ohio State University, USA, 2015.
- [19] **J. J. E. Slotine**, « Applied Nonlinear Control », Prentice-Hall, Inc., 1991
- [20] **A. J. Fossard**, « Commande à structure variable, systèmes de régulation, Collaboration automatique ». Editions Masson,1996
- [21] **Bühler H**, « Réglage par mode de glissement », polytechniques Romandes, Lausanne, 1986.
- [22] **Ghellab Mohammed Zinelaabidine** « Commandes Non Linéaires Robustes Appliquées À un Hélicoptère Autonome,Simulation et Expérimentation », thèse de doctorat, université de M'sila, 2020.
- [23] **K. Saoudi, M. bentata**, « Commande hybride robuste avec gain adaptatif appliquée à un simulateur de vol d'hélicoptère à deux degrés de liberté », mémoire de master, Université de M'sila, 2019.
- [24] **A. Amer, E. Sallam, W. Elawady**, « Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators », *Applied Soft Computing*, 11 (8), pp. 4943–4953, Dec.2011.

Résumé : Le projet présenté se concentre sur la description et la modélisation du système de pendule-chariot en tant que système non linéaire sous actionné à une seule entrée et deux sorties (SIMO). Nous avons appliqué un régulateur PID et un régulateur PID adaptatif pour assurer la stabilité et la robustesse du système de pendule-chariot. Ensuite, nous avons étudié la Commande Mode Glissant (CMG) pour renforcer le contrôle contre les incertitudes. L'autre direction que nous avons suivie, pour améliorer les performances de cette technique de commande, est celle qui consiste à associer la commande floue et la commande par mode de glissement adaptative, puis nous avons réalisé une étude comparative entre les différentes lois de commandes développées pour évaluer leur performance et leur robustesse.

Mots clés : Pendule-chariot, commande mode glissant, logique floue, gain adaptatif, régulateur PID

ملخص: المشروع المقدم يركز على وصف ونمذجة نظام نواس العربة كنظام لا خطي ذو مدخل واحد ومخرجين. قمنا بتطبيق منظم (PID) ، ومنظم (PID) التكيفي لتحقيق الاستقرار والثبات في نظام نواس العربة. بعد ذلك، درسنا وحدة التحكم في النمط الانزلاقي (CMG) من أجل جعل التحكم قوياً ضد حالات الارتياح، تم إدراج ملاحظ غامضي يعمل على تكيف معامل الموجود على مستوى مخرج التحكم. في الأخير قمنا بتطبيق جميع أنظمة التحكم المحصل عليها على نظام نواس العربة مرفقة بالنتائج الموضحة، والتي أثبتت فعالية التقنيات المقترحة. في النهاية، قمنا بدراسة مقارنة بين قوانين الرقابة المختلفة التي تم تطويرها لتقييم أدائها ومثابقتها.

كلمات مفتاحية: نواس العربة، النمط الانزلاقي، المنطق الضبابي، المعامل التكيفي، منظم PID

Abstract: The presented project focuses on the description and modeling of the cart-pendulum system as a single-input, two-output (SIMO) underactuated nonlinear system. We applied a PID controller and an adaptive PID controller to ensure the stability and robustness of the cart-pendulum system. Then, we studied the Sliding Mode Control (SMC) to strengthen the control against uncertainties, we established a link between fuzzy logic and sliding mode control with adaptive gain, then we carried out a comparative study between the different control developed to evaluate their performance and robustness.

Keywords: cart-pendulum, sliding mode cotroler, fuzzy logic, Adaptive gain, PID controller