

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERE DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de **MASTER PROFESSIONNEL**

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Automatique**

Spécialité : **Automatique industrielle**

Présenté par

Hemiche LOUNAS

Ouaked LYNDA

Thème

Contrôle non Linéaire d'un Robot Manipulateur Flexible

Mémoire soutenu publiquement le 24/06/ 2024 devant le jury composé de :

M. Kasri AHMED

MAA, UMMTO, Président

Mme. Kherraz KHEDOUDJA

MCB, UMMTO, Encadrant

Mme. Arrar Nacera

MAA, UMMTO, Examineur

Mme. Houacine KARIMA

MCB, UMMTO, Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui m'ont permis de réaliser mes rêves.

À ma famille, pour leur encouragement constant et leur compréhension durant les moments de doute.

À mes amis, pour leur présence, leur écoute et leur humour, qui ont rendu ce parcours plus léger et agréable.

À notre professeure encadrant Madame KHERRAZ pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et son engagement constant qui ont été essentiels à la réalisation de notre mémoire.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont soutenu dans cette aventure académique.

LYNDIA

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui m'ont permis de réaliser mes rêves.

À ma famille, pour leur encouragement constant et leur compréhension durant les moments de doute.

À mes amis, pour leur présence, leur écoute et leur humour, qui ont rendu ce parcours plus léger et agréable.

À notre professeure encadrant Madame KHERRAZ pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et son engagement constant qui ont été essentiels à la réalisation de notre mémoire.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont soutenu dans cette aventure académique.

LOUKAS

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a été une aventure intellectuelle et personnelle qui n'aurait pas été possible sans le soutien et les encouragements de nombreuses personnes que nous tenons à remercier ici.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde reconnaissance à madame KHERRAZ pour sa guidance experte, sa patience et ses conseils éclairés. Sa rigueur scientifique et son engagement ont été une source d'inspiration et un soutien inestimable tout au long de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux jurys, pour leur temps et leurs remarques constructives qui vont permettre d'enrichir ce travail.

Un grand merci à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour nous avoir offert un cadre propice à la recherche et pour les ressources mises à ma disposition. Nous remercions particulièrement toutes les personnes de la bibliothèque, pour leur aide précieuse et leur disponibilité.

Nous sommes également reconnaissant envers nos amis, pour leur soutien moral et leurs précieux conseils. Vos discussions stimulantes et votre amitié ont été des moteurs essentiels tout au long de cette aventure.

Nous tenons à remercier nos familles, notamment nos parents, pour leur soutien indéfectible et leur compréhension. Votre amour et vos encouragements ont été une source de force inestimable.

Enfin, nous n'oublions pas de remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'achèvement de ce mémoire. Votre aide et votre soutien ont été essentiels et nous vous en sommes profondément reconnaissants.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Robots manipulateurs à articulations flexibles - Modélisation	
I.1. Introduction	3
I.2. Terminologie générale [1]	3
I.2.1 Historique	3
I.3. Classification des robots	4
I.4. Robots manipulateurs flexibles-motivation et application	5
I.4.1. Motivation	5
I.4.2. Applications	5
I.5. Modélisation des robots à articulations flexibles	6
I.5.1. Modélisation dynamique d'une articulation flexible	6
I.5.2 Modèle dynamique [1].....	6
I.5.2.. 1 Calcul d'énergie cinétique.....	8
I.5.2.2 Calcul d'énergie potentielle	8
I.5.2.3. Calcul du lagrangien	9
I.6.Conclusion	11
Chapitre II : Théorie de la commande par mode glissant	
II.1. Introduction	13
II.2. Théorie de la commande par mode de glissement	13
II.3. Conception de la commande par mode glissant	14
II.3.1. Choix de la surface de glissement	15
II.3.2. Conditions de convergence et d'existence.....	16
II.3.2.1. Fonction discrète de commutation	16
II.3.2.2. Fonction de Lyapunov.....	16
II.3.3. Calcul de la commande	16
II.3.3.1. Principe de la commande de glissement dans le cas linéaire	18
II.4. Avantages	20
II.5. Phénomène de chattering	20
II.6. Conclusion	21
Chapitre III : Théorie de la commande par logique floue	
III. 1. Introduction	23
III.2. Intérêt de la logique floue	23
III.3. Logique classique et Logique floue	23
III.4. Commande floue	24
III.4 .1. Historique.....	24
III.5. Ensembles flous	24
III.5.1. Comparaison entre la logique floue et la logique classique	25
III.5.2. Manipulations des sous-ensembles flous.....	26
III.5.3. Complémentation d'un sous-ensemble flou A	27
III.6. Inclusion d'un sous-ensemble flou A dans un sous-ensemble flou B	27
III.7. Fonctions d'appartenances floues	28

III.8. Opérateurs de la logique floue	29
III.9. Commande Floue (contrôleur flou)	31
III.10. Fuzzification	32
III.10.1. Base de règles.....	32
III.10.2. Inférence floue	32
III.10.3. Agrégation des règles	33
III.11. Défuzzification.....	34
III.12. Caractéristiques structurelles.....	36
III.13. Caractéristiques paramétriques	36
III.14. Domaines d'application	37
III.15. Avantages et Inconvénients	38
III.16. Conclusion.....	38
<i>Chapitre IV : Commande par mode glissant-flou du robot flexible</i>	
IV .1. Introduction.....	39
IV.2. Mise en œuvre de la loi de commande par mode de glissement	39
IV.3. Commande par mode glissant (MG).....	39
IV.3.1. Calcul de la commande	40
IV.3.2. Calcul de la commande équivalente	40
IV.3.3. Résultats des simulations et interprétation	42
IV.4. Test de robustesse	47
IV.4.1. Introduction de perturbation et des variations paramétriques :.....	47
IV.5. Commande par mode glissant-flou	52
IV.5.1 Conception du régulateur flou	52
IV.5.2. Résultats des simulations.....	54
IV.6. Test de robustesse	58
IV.6.1. Introduction de perturbations et variation paramétrique.....	58
IV.7. Conclusion	63
Conclusion Générale	65
Bibliographie	66

Liste des figures

<i>Figure I.1: Robot manipulateur rigide</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2 : Schéma d'une articulation rigide</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3: Robot manipulateur flexible</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4 : Schéma d'une articulation flexible</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.5 : Coordonnées généralisées.</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.6 : Schéma de l'articulation flexible avec le schéma équivalent du moteur.</i>	<i>9</i>
<i>Figure II.1: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.</i>	<i>14</i>
<i>Figure II.2: Représentation de la commande discontinue</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.3: Phénomène de chattering.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure III.1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous.</i>	<i>25</i>
<i>Figure III.2 : Fonctions d'appartenance triangulaire (A), et trapézoïdale (B).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure III.4 : Fonction d'appartenance $A \cap B$</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.5 : Opérateur de complémentation de la fonction d'appartenance A.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.6 : Opérateur (ET).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.7 : Opérateur (ET).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.8 : structure d'un contrôleur flou</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.9 : Agrégation des règles</i>	<i>33</i>
<i>Figure III.10 : Représentation du centre de gravité</i>	<i>35</i>
<i>Figure IV.1 : Schéma bloc de la commande par modes glissants</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV.2 : Trajectoire désirée.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV.3 : Trajectoire avec la commande par mode glissant.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.4 : Angle de déflexion.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.5 : Erreur de position angulaire</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.6: Dérivé de l'erreur.</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.7 : Surface de glissement.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.8 : Commande U.</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV. 9 : Trajectoire avec la commande par mode glissant et perturbation.</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV.10 : Angle de déflexion.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV.11 : Erreur de position angulaire</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV.12 : Dérivé de l'erreur.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.13 : Surface de glissement.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.14 : Commande U</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.15 : Fonction d'appartenance.....</i>	<i>52</i>

<i>Figure IV.16 : schéma bloc commande glissant -flou.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.17 : Trajectoire désirée.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV.18 : Trajectoire avec commande par mode glissant-flou.</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.19 : Angle de déflexion.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV.20 : Erreur de position angulaire</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV.21 : Dérivé de l'erreur.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure IV.22 : Commande U.</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV.23 : Trajectoire avec la commande par glissant-flou et perturbation.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.24 : Angle de déflexion.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.25 : Erreur de position angulaire</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV.26 : Dérivé de l'erreur.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure IV.27 : Commande U.....</i>	<i>62</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 Les valeurs numériques du système</i>	<i>11</i>
<i>Tableau III.1 Comparaison entre la méthode centre de gravité et maximum.....</i>	<i>36</i>

Introduction Générale

Introduction générale

L'émergence des robots manipulateurs flexibles représente une avancée significative dans le domaine de la robotique moderne. Leur capacité d'adaptation à divers environnements complexes et leur efficacité élevée les rendent supérieurs à de nombreuses autres technologies robotiques. Ces robots trouvent des applications variées, notamment dans l'industrie manufacturière, la médecine et la logistique.

Les robots manipulateurs flexibles sont caractérisés par des dynamiques fortement non linéaires et une grande complexité. Leur modélisation et leur contrôle ont attiré l'attention des chercheurs ces dernières années, principalement en raison des nombreux avantages qu'ils offrent par rapport aux robots rigides, tels que la réduction du poids, une consommation énergétique moindre, une sécurité de fonctionnement accrue, et une vitesse supérieure. Toutefois, ces avantages entraînent des déformations vibratoires, qui peuvent nuire aux performances en termes de temps de réponse et de précision. Pour garantir la stabilité et des performances optimales, il est essentiel de prendre en compte ces phénomènes de déformation lors de la conception des lois de commande.

Pour répondre aux exigences de performance et de robustesse, une intégration des techniques de commande non linéaire de l'intelligence artificielle avec la commande par mode glissant est particulièrement prometteuse. La théorie de la logique floue, proposée par Zadeh en 1965, permet de représenter des informations vagues et imprécises en modélisant le raisonnement humain à travers des variables linguistiques.

La commande par mode glissant, une classe des systèmes à structure variable, implique une commutation entre deux valeurs en fonction du signe d'une fonction définie dans l'espace d'état, correspondant à la surface de glissement. Cette méthode est réputée pour sa robustesse et sa simplicité d'implémentation. Cependant, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de haute fréquence autour de la surface de glissement, conduisant au phénomène de chattering, qui constitue le principal défi de cette approche.

Motivés par les avantages des robots manipulateurs flexibles, la capacité de raisonnement de la logique floue et la robustesse de la commande par mode glissant, nous visons à élaborer une commande robuste exploitant ces deux approches pour le suivi de trajectoire d'un robot manipulateur à articulation flexible et la suppression des vibrations.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

1. Chapitre 1 : Approfondissement de la modélisation dynamique du robot flexible, mettant en lumière les principes opérationnels fondamentaux et les défis de conception.

2. Chapitre 2 : Exploration détaillée de la théorie de la commande par mode glissant, promettant de garantir la stabilité et la robustesse des systèmes dynamiques, y compris les robots flexibles.
3. Chapitre 3 : Étude de la théorie du contrôle par logique floue, une approche innovante pour gérer l'incertitude et la variabilité dans les systèmes dynamiques, offrant une alternative dans le contrôle des robots flexibles.
4. Chapitre 4 : Introduction d'une approche de contrôle hybride combinant le mode glissant avec le contrôle par logique floue, visant à tirer parti des avantages de chaque méthode pour améliorer les performances et l'efficacité des robots flexibles dans des environnements variés et difficiles.

En résumé, ce mémoire propose une étude approfondie de la modélisation et du contrôle non linéaire des robots flexibles, explorant les subtilités de ce domaine dynamique afin de contribuer aux avancées dans ce secteur en constante évolution.

Chapitre I :
Robots manipulateurs à
articulations flexibles -
Modélisation

I.1. Introduction

La robotique, qui résulte de la fusion intégrée de disciplines telles que la mécanique, l'automatique, l'électrotechnique, le traitement du signal, l'informatique et les communications, incarne l'essence même de l'innovation technologique. À travers cet écosystème multidisciplinaire, émerge une catégorie d'entités mécaniques dotées d'intelligence artificielle : les robots.

Définis par l'ATILF (Analyse et Traitement Informatique de la Langue Française) comme des dispositifs exécutant des tâches spécifiques grâce à des systèmes de commande automatique à base de microprocesseurs, ces entités trouvent leur place dans des domaines aussi divers que l'industrie, la recherche scientifique, la défense ou encore le quotidien domestique.

L'Association Française de Normalisation, quant à elle, précise la nature de ces entités mécaniques, décrivant un robot comme un système manipulable, reprogrammable et polyvalent, doté de plusieurs degrés de liberté et capable de manier divers matériaux, pièces ou outils. Leur apparence, souvent caractérisée par des bras articulés et des poignets, reflète leur adaptabilité et leur capacité à exécuter une multitude de tâches programmées.

Au cœur de cette convergence technologique, où se mêlent mécanique, automatique, électrotechnique, traitement de signal, informatique et communications, émerge un objectif primordial : décrire et modéliser une nouvelle génération de robots novateurs. Ces robots se distinguent par une caractéristique articulaire singulière, à savoir leur flexibilité. Ce chapitre s'attache ainsi à explorer en profondeur cette classe de robots, présente dans une multitude de secteurs, et à mettre en lumière leur potentiel révolutionnaire dans le paysage technologique contemporain.

I.2. Terminologie générale [1]

Le mot "robot" trouve son origine dans le terme tchèque "robota", qui signifie "travail" ou "service". De là, découle le terme "robotique". C'est l'écrivain Isaac Asimov, dans son récit de science-fiction "Menteur !", qui a introduit pour la première fois le terme "robotique" dans le langage, bien qu'il n'ait pas réalisé à l'époque qu'il allait populariser ce mot. Il a simplement pensé qu'il existait déjà, comme d'autres termes comme "mécanique" ou "électronique".

I.2.1 Historique

- **IVe siècle av. J.-C.** : La colombe volante d'Archytas de Tarente
- **1er siècle** : Les statues animées des temples grecs et romains
- **1920** : Le mot "robot" est inventé par Karel Čapek

- **1959** : Invention d'Unimate, le premier robot industriel
- **1970** : Les premiers robots industriels sont utilisés dans les usines
- **1980** : Développement des robots humanoïdes
- **1990** : Apparition des robots chirurgicaux
- **2000** : Développement des robots volants (drones)
- **2010** : Développement de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pour la robotique
- **2020** : Les robots sont présents dans tous les aspects de la vie quotidienne

I.3. Classification des robots

Les robots manipulateurs peuvent être divisés en deux catégories en fonction de leurs configurations :

- Le robot manipulateur rigide, tel qu'illustré dans la figure (I.1), se déplace à des vitesses bien inférieures à la fréquence fondamentale du système en raison de son poids et de sa structure. Ce type de robot est équipé d'articulations rigides, comme le montre la figure (I.2).



Figure I.1: Robot manipulateur rigide

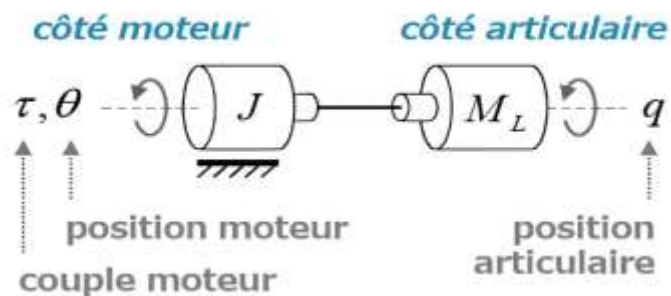


Figure I.2 : Schéma d'une articulation rigide

- Le robot manipulateur flexible, tel qu'illustré dans la figure (I.3), est capable de se déplacer plus rapidement par rapport au premier type. Il est équipé d'articulations et/ou de segments flexibles, comme le montre la figure (I.4). Tel que :

- 1. Articulations flexibles** : Une connexion entre deux parties permettant un mouvement fluide et varié, souvent dans des mécanismes mécaniques ou des systèmes industriels, tout en maintenant une certaine stabilité.
- 2. Segments flexibles** : Des parties ou éléments d'un système capables de se déformer ou de se plier en réponse à des forces externes, offrant ainsi une adaptabilité ou un ajustement dans le système.



Figure I.3: Robot manipulateur flexible

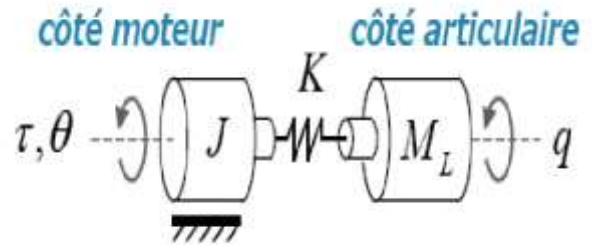


Figure I.4 : Schéma d'une articulation flexible

I.4. Robots manipulateurs flexibles-motivation et application

I.4.1. Motivation

L'utilisation de robots manipulateurs flexibles est motivée par plusieurs avantages. Premièrement, leur flexibilité améliore la performance en permettant des vitesses et une précision accrue, essentielles pour des tâches comme l'assemblage électronique. Ensuite, cela réduit la masse et les coûts grâce à l'utilisation de matériaux moins chers et plus légers, ce qui rend les robots plus économes en énergie. De plus, leur adaptabilité à différents environnements et tâches, même non structurées ou dynamiques, les rend plus polyvalents. Enfin, leur flexibilité favorise une meilleure collaboration avec les humains, rendant le travail plus sûr et efficace lorsqu'ils travaillent ensemble.

I.4.2. Applications

- **Industrie** : Les robots manipulateurs flexibles peuvent être utilisés dans divers secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aéronautique, l'agroalimentaire et l'électronique, pour des tâches telles que l'assemblage, la manipulation de produits fragiles, le soudage et la peinture.
- **Logistique** : Les robots flexibles peuvent être utilisés dans les entrepôts pour la manutention de colis, le tri et le chargement/déchargement des camions.
- **Médecine** : La robotique flexible peut être utilisée pour la chirurgie assistée par robot, la rééducation et la manipulation d'instruments médicaux.
- **Recherche et développement** : Les robots flexibles sont utilisés dans les laboratoires de recherche pour explorer de nouvelles technologies et applications en robotique.
- **Construction** : pour la pose de matériaux, la peinture et la réparation de structures.
- **Agriculture** : pour la cueillette de fruits et légumes, la pulvérisation de pesticides et l'entretien des cultures.

- **Nettoyage** : pour le nettoyage des sols, des vitres et des murs.
- **Exploitation minière** : pour l'extraction de minéraux et le transport de matériaux.
- **Espace** : pour la maintenance des satellites et la construction de structures spatiales.

I.5. Modélisation des robots à articulations flexibles

La modélisation des robots à articulations déformables a été suggérée comme une expansion de la modélisation des robots rigides.

Pour les robots industriels dotés de corps rigides et d'articulations flexibles, les déformations élastiques se localisent principalement dans les chaînes de transmission articulaires, qu'elles soient rotatives ou prismatiques. Ces déformations ajoutent des degrés de liberté flexibles aux degrés de liberté du robot rigide. Une raideur en traction-compression introduit une liaison prismatique, tandis qu'une raideur en torsion introduit une liaison rotative. Ainsi, un robot avec "n" articulations flexibles possède "2n" degrés de liberté.

Cette modélisation est applicable à tous les robots où chaque articulation présente une certaine flexibilité.

I.5.1. Modélisation dynamique d'une articulation flexible

La modélisation dynamique des articulations flexibles établit les relations entre les efforts des actionneurs (couples et forces) et les positions, vitesses et accélérations des articulations pour obtenir l'équation de mouvement du robot. Cette flexibilité est représentée par une raideur simulant la déformation élastique le long de l'axe du moteur.

I.5.2 Modèle dynamique [1]

L'objectif est de contrôler la trajectoire d'un robot flexible en utilisant un modèle, même approximatif. La sortie à contrôler est la trajectoire du bras, déterminée par la somme de l'angle du moteur et de l'angle de déflexion du ressort α par rapport à l'arbre du moteur.

Le modèle non linéaire est donné sous la forme suivante :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{I.1})$$

$$Y = Cx \quad (\text{I.2})$$

Différentes approches sont possibles pour obtenir un modèle dynamique, parmi les plus utilisées sont la méthode des équations d'Euler Lagrange, Newton-Euler et le principe de moindre action de Hamilton. Une méthode récente, exploitant des éléments de la théorie des graphes linéaires, permet un calcul systématique de modèles dynamiques multi-corps flexibles.

Cette méthode est implémentée dans le logiciel MAPLE. Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le formalisme des équations d'Euler Lagrange pour la modélisation.

Le lagrangien est défini par :

$$L = Ec - Ep \quad (\text{I.3})$$

Tel que :

Ec : Energie cinétique.

Ep : Energie potentielle.

Les équations d'Euler Lagrange du système sont données comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\delta L}{\delta q} = \tau \quad (\text{I.4})$$

q : est le vecteur des coordonnées généralisées.

τ : Vecteur des couples extérieurs appliqués au manipulateur (couple moteur).

Les coordonnées généralisées sont la rotation de l'arbre du moteur et l'angle de déplacement du ressort par rapport à sa position d'équilibre.

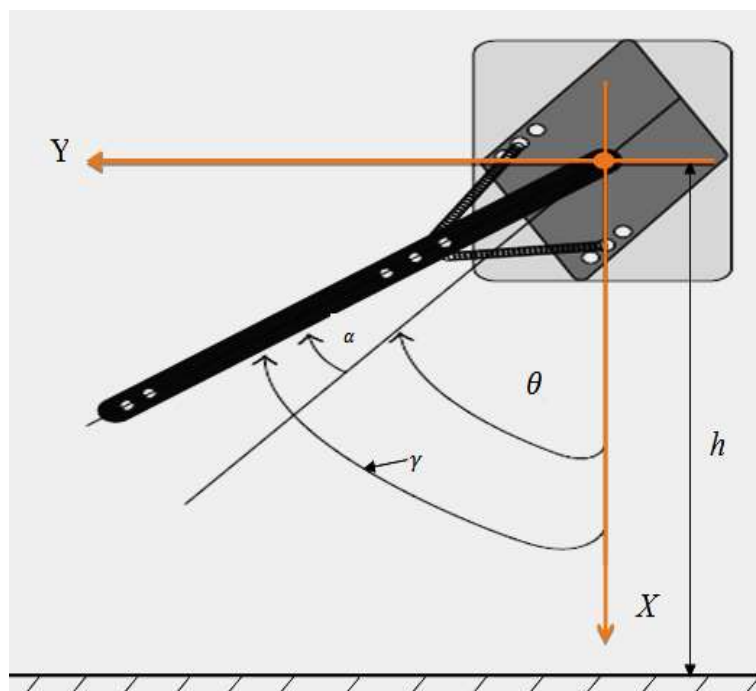


Figure I.5 : Coordonnées généralisées

I.5.2.. 1 Calcul d'énergie cinétique

$$Ec = Ec_m + Ec_r \quad (\text{I.5})$$

$$Ec_m = \frac{1}{2} J_{eq} \dot{\theta}^2 \quad (\text{I.6})$$

$$Ec_r = \frac{1}{2} J_{arm} (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (\text{I.7})$$

D'où :

$$Ec = \frac{1}{2} J_{eq} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_{arm} (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (\text{I.8})$$

Ec_m : Energie cinétique du moteur.

Ec_r : Energie cinétique du ressort.

J_{eq} : Moment d'inertie du moteur.

J_{arm} : Moment d'inertie du segment.

I.5.2.2 Calcul d'énergie potentielle

$$Ep = Ep_p + Ep_r \quad (\text{I.9})$$

$$Ep_p = mgh \cos(\theta + \alpha) \quad (\text{I.10})$$

$$Ep_r = \frac{1}{2} K_{stiff} \alpha^2 \quad (\text{I.11})$$

D'où :

$$Ep = mgh \cos(\theta + \alpha) + \frac{1}{2} K_{stiff} \alpha^2 \quad (\text{I.12})$$

Ep_p : Energie potentielle du pasteur.

Ep_r : Energie potentielle du ressort.

m : Masse du robot.

g : Constante de gravité.

h : Hauteur du robot.

K_{stiff} : Raideur articulaire.

I.5.2.3. Calcul du lagrangien

$$L = \frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_{arm}(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 - mgh \cos(\theta + \alpha) + \frac{1}{2}K_{stiff}\alpha^2 \quad (I.13)$$

On applique le formalisme de Lagrange :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \end{cases} \quad (I.14)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = J_{eq}\ddot{\theta} + J_{arm}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) - mgh \sin(\theta + \alpha) = \tau \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = J_{arm}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + K_{stiff}\alpha - mgh \sin(\theta + \alpha) = 0 \end{cases} \quad (I.15)$$

Le couple moteur τ est en fonction de la tension U appliquée à l'induit qui constitue l'entrée de commande du système

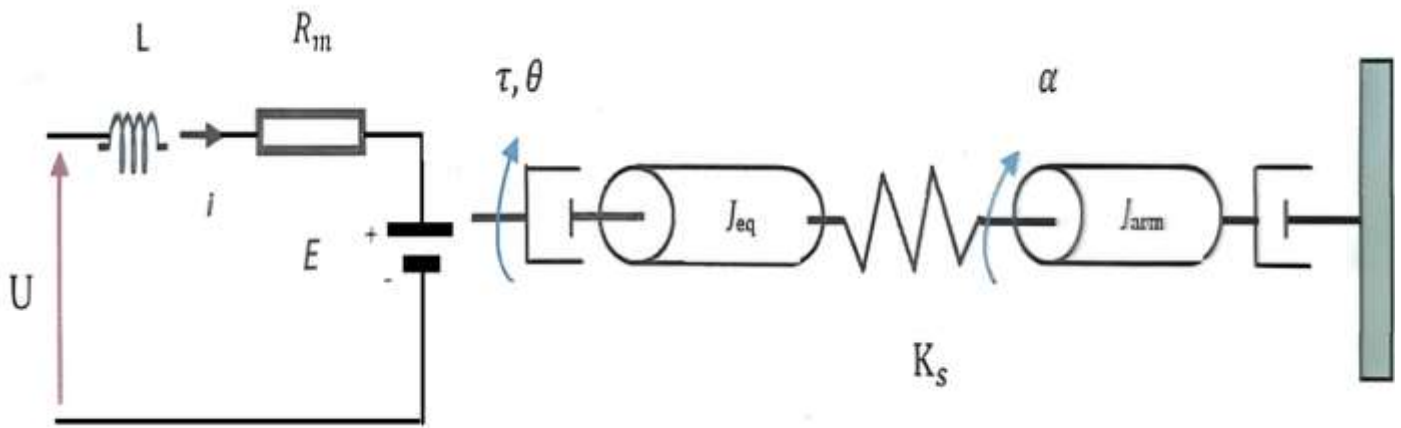


Figure I.6 : Schéma de l'articulation flexible avec le schéma équivalent du moteur

$$U = iR_m + E \quad (I.16)$$

$$E = K_m K_g \Omega \quad (I.17)$$

$$\tau = \eta_m \eta_g K_t K_g i \quad (I.18)$$

Des équations (I.16) et (I.17) on tire le courant i :

$$i = \frac{U - K_m K_g \Omega}{R_m} \quad (I.19)$$

Etant $\Omega = \dot{\theta}$ est la vitesse angulaire du moteur et en substituant l'équation (I.19) dans (I.18) on aura :

$$\tau = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g (U - K_g K_m \dot{\theta})}{R_m} \quad (\text{I.20})$$

On choisit :

$$\theta = x_1$$

$$\alpha = x_2$$

$$\dot{\theta} = x_3$$

$$\dot{\alpha} = x_4$$

Le système sera écrit de la manière suivante :

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

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

$$\ddot{\theta} = \frac{K_{stiff}}{J_{eq}} x_2 + \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m)}{(J_{eq} R_m)} x_3 + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{eq} R_m} u$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{(-K_{stiff}(J_{eq} + J_{arm}))}{J_{eq} J_{arm}} x_2 + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m}{J_{eq} R_m} x_3 + \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_g)}{J_{eq} R_m} u \quad (\text{I.21})$$

La sortie de ce système est la position de segment :

$$y = \theta = x_1 \quad (\text{I.22})$$

Le système maintenant peut s'écrire sous la forme d'état :

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u$$

$$f(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_{stiff}}{J_{eq}} \\ \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m)}{(J_{eq} R_m)} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{eq} R_m} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$y(x) = x_1$$

Les valeurs numériques de notre système sont données par le tableau (I.1) :

Symbole	Paramètre	Valeur
R_m	Résistance d'induit (Ω)	2.6
K_m	Constante de contre-électromotrice du moteur (V.s/rad)	0.00767
K_t	Constante de couple du moteur (N.m/A)	0.00767
J_{arm}	Inertie totale du bras ($Kg.m^2$)	0.0035
J_{eq}	Inertie équivalente ($Kg.m^2$)	0.0026
K_g	Rapport de réduction élevé	14.5
K_{stiff}	Raideur articulaire (N.m/rad)	1.2485
B_{eq}	Amortissement visqueux équivalent (N.m.s/rad)	0.004
η_g	Efficacité de la boîte de vitesses	0.9
η_m	Efficacité du moteur	0.69
m	La masse du robot (Kg)	0.403
g	La gravité (N /Kg)	9.81
h	La hauteur du robot (m)	0.06

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les robots manipulateurs dotés d'articulations flexibles, en illustrant quelques exemples de leurs applications dans divers domaines. Nous avons souligné la particularité de ces articulations flexibles, qui permettent de doubler le nombre de degrés de liberté par rapport aux systèmes rigides conventionnels. En outre, nous avons présenté une modélisation dynamique qui prend en compte la souplesse articulaire prédominante, ouvrant ainsi la voie au développement d'un modèle comportemental pour une simulation plus poussée. Pour obtenir le modèle dynamique du robot manipulateur flexible, nous avons choisi le formalisme d'Euler-Lagrange. Ce modèle, que nous prévoyons d'utiliser dans le dernier chapitre, sera essentiel pour approfondir notre compréhension du comportement des robots manipulateurs à articulations flexibles.

Chapitre II :
Théorie de la commande par
mode glissant

II.1. Introduction

La résolution de problèmes de commande implique souvent des écarts entre le système réel et le modèle mathématique utilisé pour sa conception. Ces différences peuvent découler de variations dans les paramètres dynamiques du système ou de simplifications du comportement complexe du système par le modèle. Cette réalité a suscité un intérêt pour le développement de méthodes de commande robustes visant à surmonter ces défis.

La commande par mode glissant représente une approche visant à guider le système vers un comportement souhaité en utilisant une commande discontinue. Son objectif est de contraindre le système à évoluer vers une surface spécifique, appelée surface de glissement, dans un temps fini, et de maintenir cette trajectoire conformément aux dynamiques désirées. Cette méthode implique de ramener la trajectoire de l'état du système vers la surface de glissement et de la faire commuter de manière appropriée autour de cette surface jusqu'à ce qu'elle atteigne un point d'équilibre, ce qui caractérise le phénomène de glissement.

L'un des principaux avantages de cette approche est sa robustesse face aux perturbations et aux incertitudes du modèle. Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail le concept général de la commande par mode de glissement.

II.2. Théorie de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable est un système dont la configuration évolue pendant son fonctionnement. Ce type de système est caractérisé par l'adoption d'une logique de commutation, permettant ainsi une transition fluide d'une structure à une autre à tout moment. De plus, un tel système peut présenter de nouvelles propriétés qui ne sont pas présentes dans chacune des structures individuelles. Dans le cadre de la commande par mode de glissement, la trajectoire de l'état du système est dirigée vers une surface spécifique, puis, à l'aide d'une loi de commutation appropriée, elle est maintenue à proximité de cette surface, connue sous le nom de surface de glissement. Les mouvements qui se produisent dans cette configuration sont appelés mouvements de glissement.

La trajectoire dans le plan de phase se compose de trois segments distincts :

- Le mode de convergence (MC) : est celui au cours duquel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase (x_1, x_2) , converge vers la surface de commutation S $(x_1, x_2) = 0$. Ce mode est défini par une loi de commande discontinue et un critère de convergence.

- Le mode de glissement (MG) : est celui où la variable d'état atteint la surface de glissement et converge vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est déterminée par le choix de la surface de glissement $S(x_1, x_2) = 0$.
- Le mode de régime permanent (MRP) : Ce mode est intégré pour étudier la réponse du système autour de son point d'équilibre (l'origine du plan de phase). Il est défini par la qualité et les performances de la commande.

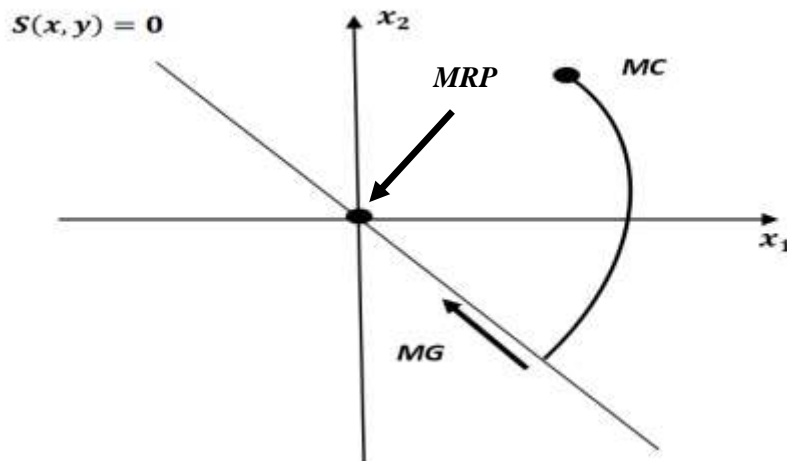


Figure II.1: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

II.3. Conception de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant présente de nombreux avantages importants, tels que la haute précision, la stabilité robuste, la simplicité de conception, entre autres. Ces caractéristiques la rendent particulièrement adaptée pour les systèmes dont le modèle est imprécis.

Dans cette configuration, la structure d'un contrôleur se divise en deux parties distinctes : une partie continue qui représente la dynamique du système pendant le mode glissant, et une partie discontinue qui représente la dynamique du système pendant le mode de convergence. Ce dernier aspect revêt une importance particulière dans la commande non linéaire, car il vise à éliminer ou à réduire les effets des imprécisions et des perturbations sur le modèle.

Pour démontrer la méthode de conception du contrôle par mode glissant d'ordre un, nous prenons en considération le cas d'un système non linéaire, défini par :

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x) \cdot u \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$x \in R^n$: est le vecteur d'état.

$u \in R^m$: est le vecteur commande.

La conception de la commande peut être réalisée en trois étapes qui dépendent les unes des autres.

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

II.3.1. Choix de la surface de glissement

La surface de glissement, ou fonction de commutation, représente le comportement dynamique souhaité du système désiré en boucle fermée. Elle peut être sélectionnée comme linéaire ou non linéaire.

L'une des formes que la surface peut prendre est donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

λ : Constante positive.

r : est le degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaitre la Commande.

$e(x) = x - xd$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.

x : variable d'état.

xd : valeur désirée.

Une autre forme de la surface est la suivante :

$$S(x) = \sum_{i=1}^n c_i (x_i - x_{id}) \quad (\text{II. 3})$$

La dynamique de convergence est assurée par les choix des coefficients c_i .

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro ($s(x)=0$), dont l'unique solution est ($s(x)=0$) pour un choix convenable des paramètres.

II.3.2. Conditions de convergence et d'existence

Les conditions de convergence et d'existence sont deux critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence.

II.3.2.1. Fonction discrète de commutation

La première condition de convergence, avancée par Emilyanov et Utkin [2, 3, 4, 9], implique que la dynamique de la surface converge vers zéro. Elle est donnée par :

$$\dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (\text{II. 4})$$

II.3.2.2. Fonction de Lyapunov

L'idée est de choisir une fonction scalaire $v(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir la commande u . La fonction de Lyapunov est définie comme suit :

$$v(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (\text{II. 5})$$

Le dérivé de cette fonction est :

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) s(x) \quad (\text{II. 6})$$

Pour que la fonction $v(x)$ décroisse, il est nécessaire que sa dérivée soit strictement négative. Ceci est garanti uniquement si la condition suivante est satisfaite :

$$\dot{v}(x) = \dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (\text{II. 7})$$

L'équation (II. 7) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $s^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir de ses deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

II.3.3. Calcul de la commande

Il est nécessaire de déterminer la commande requise pour attirer la trajectoire d'état vers la surface de glissement et ensuite vers son point d'équilibre, tout en maintenant les conditions nécessaires pour que le mode de glissement existe.

L'obtention d'un régime de glissement nécessite l'utilisation d'une commande discontinue. La surface de glissement doit être attractive des deux côtés. Bien que cette commande discontinue soit essentielle, cela ne signifie pas qu'une partie continue ne puisse pas lui être ajoutée. En fait, une partie continue permet de réduire autant que nécessaire l'amplitude de la partie discontinue.

En présence de perturbations, la partie discontinue vise principalement à vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement se compose de deux parties : une partie concernant la linéarisation (\mathbf{u}_{eq}) et une autre partie stabilisante ($D\mathbf{u}$).

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + D\mathbf{u} \quad (\text{II. 8})$$

Tel que :

\mathbf{u}_{eq} : La commande proposée par Utkin, maintient la variable contrôlée sur la surface de glissement $\mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$. Cette approche, basée sur une commande équivalente dérivée de la condition $\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, agit comme un retour d'état spécifique, assurant une transition fluide entre les valeur maximales et minimales de la commande et minimisant les oscillations.

$D\mathbf{u}$: est déterminée pour vérifier la condition de convergence.

Pour mettre en évidence le calcul de la commande, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (II. 1) . Il s'agit de trouver l'expression de la commande \mathbf{u} .

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \quad (\text{II. 9})$$

Il en résulte :

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}_{eq}) + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x})D\mathbf{u} \quad (\text{II. 10})$$

Durant le mode glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente [4]:

$$\mathbf{u}_{eq} = - \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (\text{II. 11})$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \neq \mathbf{0}$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (II. 10), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x) Du \quad (\text{II. 12})$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (II. 5) devient :

$$\frac{\partial s}{\partial x} g(x) Du s(x) < 0 \quad (\text{II. 13})$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de Du doit être opposé à celui de $s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

La commande discontinue la plus basique peut être représentée sous la forme d'un relais

$$Du = -K \text{sign } s(x) \quad (\text{II. 14})$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial s}{\partial x} g(x)$

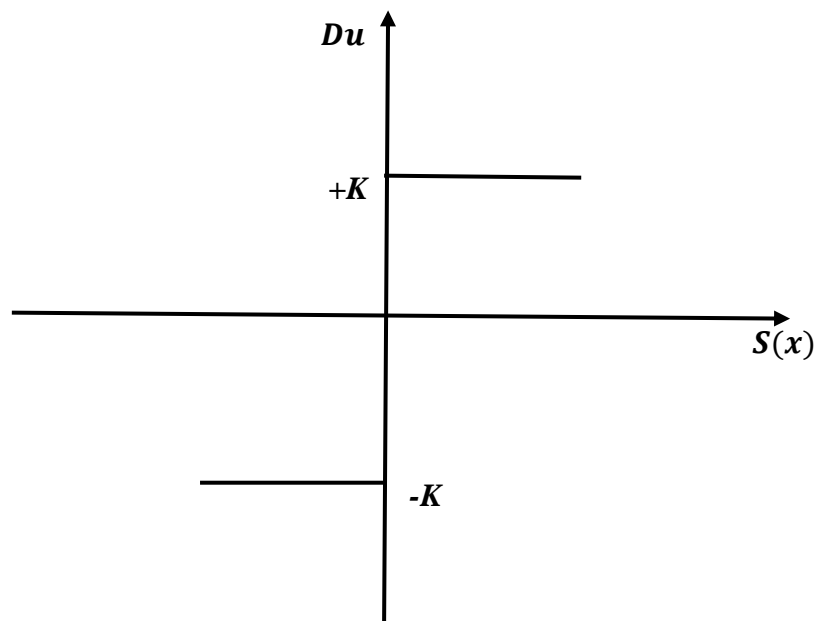


Figure II.2: Représentation de la commande discontinue

II.3.3.1. Principe de la commande de glissement dans le cas linéaire

Dans le cas où la dynamique du système et celle de la surface de glissement sont linéaires, une simplification importante survient, facilitant ainsi l'analyse et la modélisation.

Le modèle de système est alors :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

$$\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \text{ et } \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$$

La surface de glissement est :

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{Avec : } \mathbf{c} \in \mathbf{R}^{m \times n}$$

Si le système est en régime glissant alors :

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad \forall t \geq t_s$$

Avec t_s est le temps durant lequel le mode glissant est atteint. En dérivant par rapport au temps et en utilisant la même démarche que précédemment, on obtient :

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}\mathbf{B}\mathbf{u}_{eq}(t) = \mathbf{0} \quad \forall t \geq t_s$$

$$\mathbf{u}_{eq}(t) = -(\mathbf{C}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}(t)$$

$$\mathbf{u}_{eq}(t) = \mathbf{M}\mathbf{x}(t) \quad (\text{II. 17})$$

Tel que :

$$\mathbf{M} = -(\mathbf{C}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A} \quad (\text{II. 18})$$

Avec $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ est la matrice de retour alors, le modèle du comportement du système sur la surface de glissement est :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_{eq}(t)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}\mathbf{I} - \mathbf{B}(\mathbf{C}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}]\mathbf{A}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_{eq}\mathbf{x}(t) \quad \forall t \geq t_s \quad (\text{II. 19})$$

Tel que :

$$\mathbf{A}_{eq} = [\mathbf{A}\mathbf{I} - \mathbf{B}(\mathbf{C}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}]$$

\mathbf{A} : est appelée la matrice dynamique équivalente en glissement.

La matrice A_{eq} à un certain nombre de propriétés, m valeurs propres nulles et n-m valeurs propres non nulles, définissant les dynamiques de glissement.

La loi de commande discontinue est déterminée pour satisfaire les conditions de convergence (II. 14).

II.4. Avantages

La commande par mode glissant offre plusieurs avantages significatifs :

- **Robustesse face aux incertitudes et aux perturbations** : La commande par mode glissant maintient des performances stables malgré les incertitudes et les perturbations externes. Par exemple, elle permet à un robot mobile de rester sur sa trajectoire malgré les variations du terrain.
- **Performances de convergence précises et rapides** : La commande par mode glissant assure une convergence rapide vers l'état désiré, minimisant ainsi les erreurs de suivi. Par exemple, elle permet à un bras manipulateur de suivre une trajectoire précise avec peu de délai.
- **Large champ d'applications** : La commande par mode glissant est utilisée dans divers domaines, notamment la robotique, les systèmes électriques et l'aéronautique, en raison de sa polyvalence.
- **Simplicité de conception et d'implémentation** : La commande par mode glissant repose sur des concepts simples et peut être mise en œuvre avec des outils de simulation et de programmation courants, tels que MATLAB et le langage C.
- **Adaptabilité aux systèmes non linéaires complexes** : La commande par mode glissant est efficace même pour les systèmes non linéaires difficiles à modéliser précisément, comme les systèmes biologiques ou économiques.

II.5. Phénomène de chattering

En raison d'une fréquence de commutation limitée, la discontinuité de la commande Du ne produit pas un mode de glissement idéal ; plutôt, des oscillations à haute fréquence se manifestent à proximité de la surface, communément appelées réticence ou "chattering" en anglais.

Le principal inconvénient de la commande par mode glissant d'ordre un réside dans sa propension à exciter des dynamiques non modélisées, ce qui peut conduire à l'instabilité.

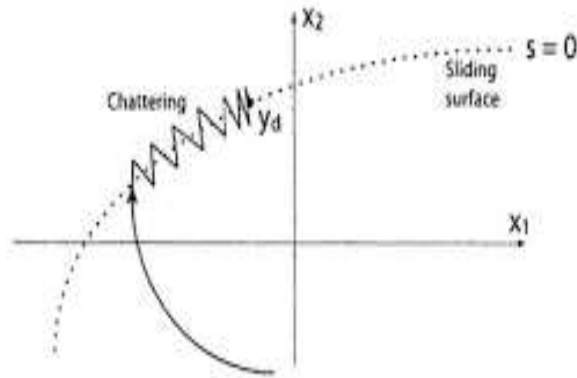


Figure II.3: Phénomène de chattering

II.6. Conclusion

La commande par mode de glissant est une méthode puissante et flexible pour contrôler des systèmes complexes. Mais son efficacité peut être compromise par le phénomène de chattering. Pour contrer ce problème, l'implantation de techniques d'atténuation telles que le filtrage, l'adaptation des gains, l'utilisation de limiteurs ou des approches hybrides s'avère essentielle. En reconnaissant ses limites et en appliquant ces techniques, la commande par mode de glissant peut être utilisée de manière efficace pour contrôler des systèmes complexes, assurant un fonctionnement optimal et solide.

Chapitre III :
Théorie de la commande par
logique floue

III. 1. Introduction

L'utilisation de la commande intelligente a plus d'intérêt pour les ingénieries et les industrielles automatiques. Elle est représentée par un ensemble de méthodes et de techniques basées sur les outils de l'intelligence artificielle (les réseaux neurones, la logique floue et les algorithmes génétiques). La logique floue est une méthode qui donne un nouveau type de paradigme informatique, capable de modéliser la propre incertitude du raisonnement humain [10].

Dans ce chapitre, nous exposons les notions de base de la théorie des ensembles flous, notamment les variables linguistiques, les fonctions d'appartenance, les règles d'inférences et les opérateurs en logique floue. Ensuite nous présentons la structure interne d'un système d'inférence floue, ainsi que les différents contrôleurs existants.

III.2. Intérêt de la logique floue

La théorie de la logique floue a été proposée par Zadeh en 1965, afin de pouvoir représenter les informations vagues et imprécises, en modélisant le mécanisme de la pensée humaine par un raisonnement approximatif basé sur des variables linguistiques. Depuis les travaux de Mamdani (1974), le domaine de contrôle par logique floue est devenu plus important. Cette technique de commande peut être utilisée à bon escient pour ses qualités à résoudre certains problèmes liés aussi bien aux erreurs de modélisation qu'à la méconnaissance du modèle du système à commander. La commande par logique floue repose sur une collection de règles linguistiques de la forme « Si ...Alors » qui traduisent la stratégie de contrôle d'un opérateur humain. Cette propriété rend l'algorithme de contrôle facile à comprendre.

III.3. Logique classique et Logique floue

La logique classique et la logique floue sont deux façons différentes de raisonnement. La logique classique fonctionne sur un mode binaire : une déclaration est soit vraie, soit fausse, sans entre-deux. Elle est simple et claire, mais elle a du mal à gérer les situations où les choses ne sont pas si nettes, comme dans le langage courant où les termes peuvent avoir différentes interprétations. C'est là que la logique floue entre en jeu.

Elle permet de prendre en compte les nuances entre le vrai et le faux, offrant ainsi une vision plus flexible et plus proche du raisonnement humain. En résumé, la logique classique est comme une boîte qui ne peut contenir que des objets carrés ou ronds, tandis que la logique floue est comme une boîte qui peut également accueillir des formes plus complexes et intermédiaires.

III.4. Commande floue

La commande floue est introduite par Mamdani et Assiliani, elle est largement développée au Japon au début des années 80. Le principe fonctionnel de la commande floue se base sur le traitement des problèmes de commande de processus, le plus souvent à partir de connaissances des experts travaillant sur le processus [11].

On peut utiliser la commande floue dans : Machines-outils, Groupes d'ascenseurs, 'appareils électroménagers, Caméras, Voitures ou hélicoptères sans pilote...

III.4.1. Historique

- **1961** : Lotfi Zadeh affirme dans son article pour un nouveau type de mathématiques « floues » [10].
- **1965** : Lotfi Zadeh introduit le concept de décors flou.
- **1969** : Marinos (Duke université) mène la première recherche visant à la mise en œuvre matérielle de la logique floue.
- **1972** : M. sugeno présent l'idée pour mesure floue [12,13].
- **1974** : E. Mamdani présente une application floue pour contrôler une machine à vapeur dans un cadre académique [11].
- **1980** : Yamakawa construit le premier circuit flou avec des composants bipolaires discrets.
- **1983** : la première application industrielle dans un four à ciment au Danemark.
- **1984** : Togai et Watanabe présentent la première implémentation VLSI des contrôleurs flous.
- **1986** : Hitachi met en service un système de métro contrôlé par la commande floue.
- **1987** : Yamakawa présente le premier contrôleur analogique- flou.
- **1988** : Togai implémente les premiers processeurs numériques flous.
- **1989** : LIFE : le laboratoire de recherche international sur le flou en ingénierie commence au Japon.
- **1990** : Yamakawa crée l'Institut des Systèmes de Logique Floue (FLSI) au Japon.
- **1992** : la première conférence internationale de l'IEEE sur le système flou.

III.5. Ensembles flous

Les ensembles flous permettent une représentation flexible où l'appartenance des éléments à un ensemble est graduelle plutôt que binaire. Cette caractéristique permet de mieux modéliser la complexité des concepts et des connaissances vagues rencontrés dans la vie quotidienne.

La fonction caractéristique de l'ensemble ne prend pas que les deux valeurs discrètes (0 ou 1).

- Valeur 0 . . . (l'élément n'appartient pas ...).
- Valeur 1 . . . (l'élément appartient à l'ensemble...)

Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1.

-Un exemple simple : Evaluation de la température d'un corps

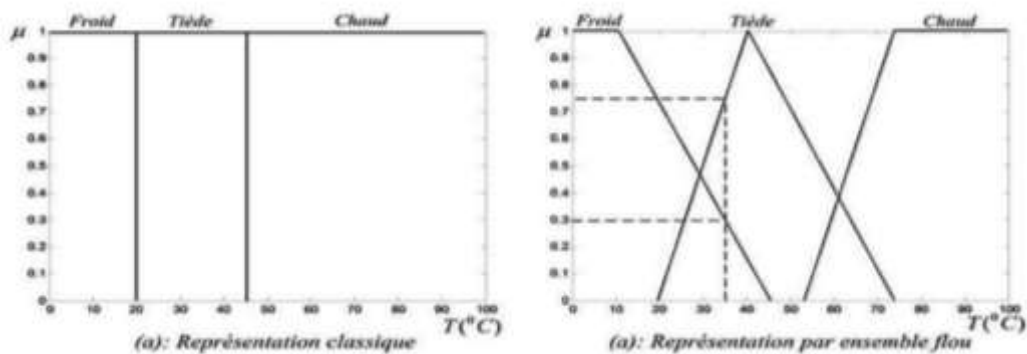


Figure III.1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous

III.5.1. Comparaison entre la logique floue et la logique classique

a) La logique booléenne, aussi appelée algèbre booléenne, est une branche de la logique formelle qui traite des opérations logiques sur des valeurs binaires (vrai ou faux, représentés respectivement par 1 et 0), tel que le corps dans notre cas, il peut-être :

- **Froid** : $\mu_{\text{Froid}} = 1$, $\mu_{\text{Tiède}} = 0$, $\mu_{\text{Chaud}} = 0$
- **Tiède** : $\mu_{\text{Froid}} = 0$, $\mu_{\text{Tiède}} = 1$, $\mu_{\text{Chaud}} = 0$
- **Chaud** : $\mu_{\text{Froid}} = 0$, $\mu_{\text{Tiède}} = 0$, $\mu_{\text{Chaud}} = 1$

Alors, on peut conclure que la température du corps ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

b) En logique floue, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble peut varier de 0 à 1, représentant la mesure dans laquelle cet élément possède les caractéristiques de cet ensemble. Par exemple, un objet peut être qualifié à la fois de "froid" et de "tiède", avec des degrés d'appartenance respectifs de 0.3 et 0.75. Cela signifie que l'objet possède des caractéristiques à la fois de la fraîcheur et de la tiédeur, mais dans des proportions différentes. La logique floue permet ainsi de capturer la nature graduelle et nuancée de la réalité, offrant une représentation plus flexible et proche de la façon dont les humains perçoivent le monde.

III.5.2. Manipulations des sous-ensembles flous

Dans le cadre des sous-ensembles flous représentés par les fonctions d'appartenance μ_A et μ_B dans l'univers U , examinons deux de ces sous-ensembles, notés A et B.

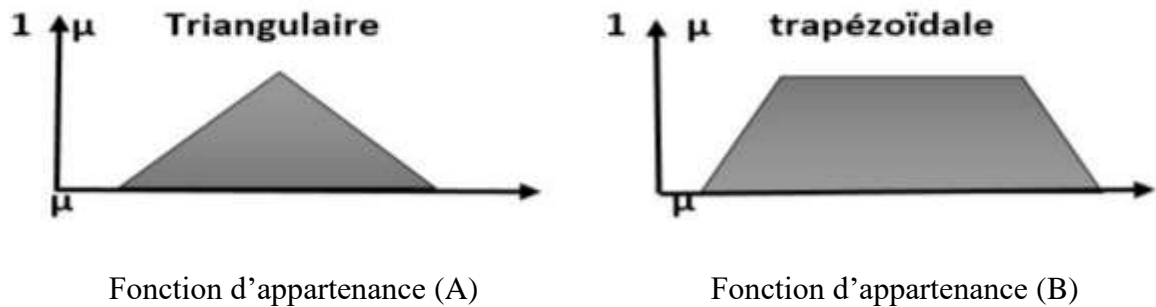


Figure III.2 : Fonctions d'appartenance triangulaire (A), et trapézoïdale (B)

- **Union :**

L'appartenance d'un élément à l'union de deux sous-ensembles flous est déterminée par la valeur maximale de son degré d'appartenance dans chacun des sous-ensembles :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]; \forall x \in U \quad (III.1)$$

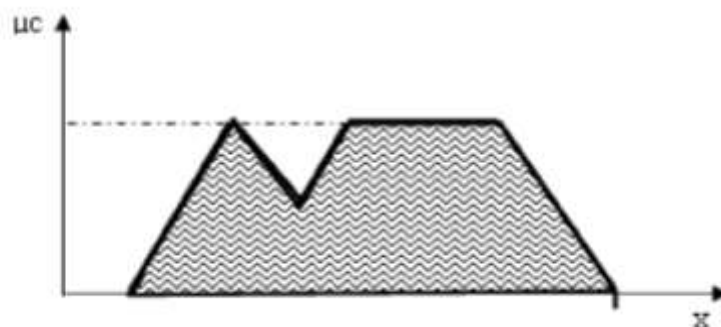


Figure III.3 : Fonction d'appartenance $A \cup B$

- **Intersection :**

L'appartenance d'un élément à l'intersection de deux sous-ensembles flous est déterminée par la valeur minimale de son degré d'appartenance dans chacun des sous-ensembles.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]; \forall x \in U \quad (III.2)$$

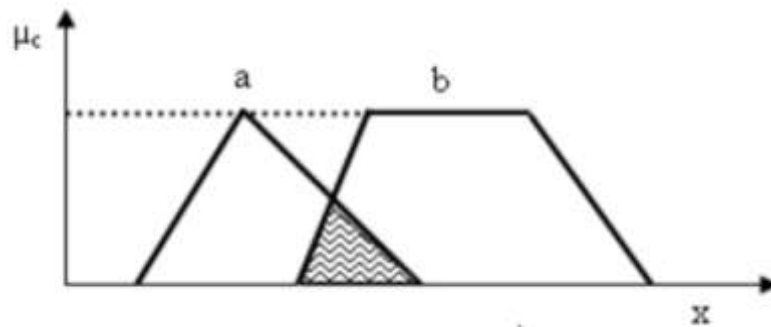


Figure III.4 : Fonction d'appartenance $A \cap B$

III.5.3. Complémentation d'un sous-ensemble flou A

L'appartenance d'un élément à la complémentation d'un sous-ensemble flou est le complément de son degré d'appartenance dans le sous-ensemble flou original.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x); \forall x \in U$$

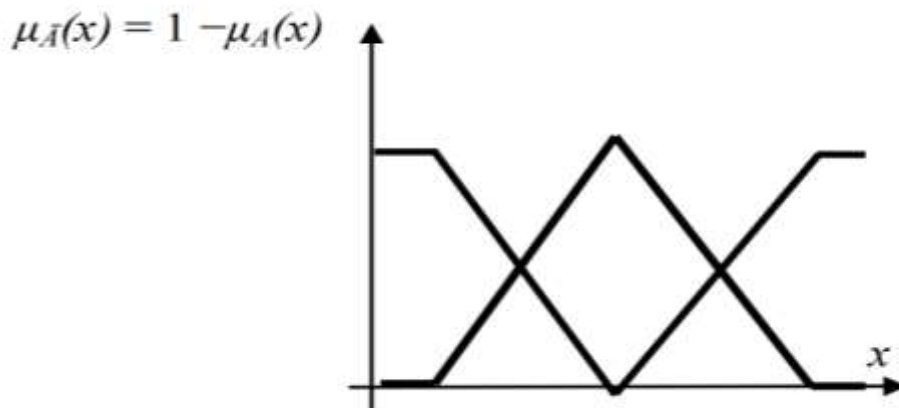


Figure III.5 : Opérateur de complémentation de la fonction d'appartenance A

III.6. Inclusion d'un sous-ensemble flou A dans un sous-ensemble flou B

Le sous-ensemble flou A est inclus dans le sous-ensemble flou B si, pour chaque élément de l'univers du discours, le degré d'appartenance de A est inférieur ou égal au degré d'appartenance de B.

$$\forall x \in U : \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

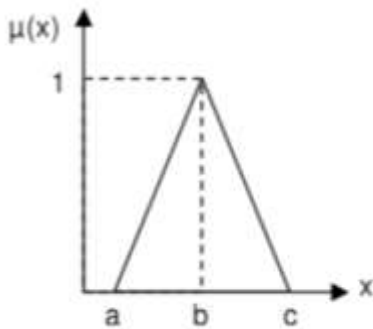
III.7. Fonctions d'appartenances floues

- **Fonction trapézoïdale :**

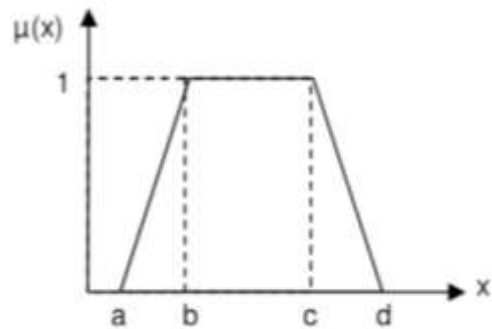
Une fonction trapézoïdale est une courbe définie par des segments de droite reliant les extrémités d'un trapèze sur un graphique, souvent utilisée pour modéliser des phénomènes ou des données entre deux valeurs limites avec des sections de valeurs constantes entre elles.

$$\mu(x; a; b; c; d) = \max\left(0; \min\left(\frac{x-a}{b-a}; 1; \frac{d-x}{d-c}\right); 0\right) \quad (III.3)$$

Où a, b, c et d sont les coordonnées des apex du trapèze. Si b=c, nous obtenons une fonction d'appartenance triangulaire.



a-Triangulaire

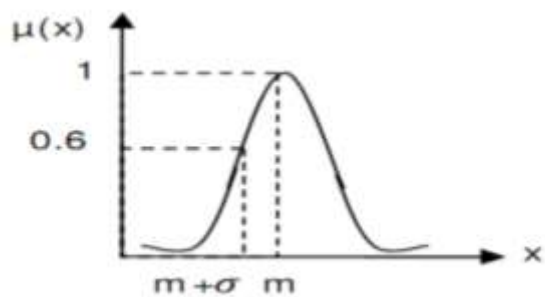


b- Trapézoïdale

- **Fonction gaussienne :**

Une fonction gaussienne est une fonction mathématique continue qui prend la forme d'une courbe en cloche symétrique autour d'un pic central. Cette fonction est définie par l'équation :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (III.15)$$

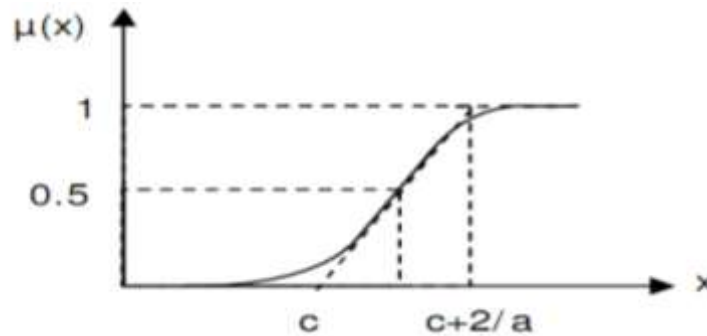


c – Gaussienne

- **Fonction sigmoïde :**

La fonction sigmoïde est une courbe en S qui transforme les valeurs d'entrée en un intervalle de 0 à 1. Elle est utilisée pour modéliser des relations non linéaires, notamment dans la modélisation de probabilités ou de catégories binaires. Cette fonction est définie par l'équation :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \quad (III.4)$$



d- sigmoïde

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée, il est crucial de sélectionner une fonction d'appartenance adaptée. Dans les cas où la dérivation de la fonction d'appartenance est nécessaire, il est recommandé d'opter pour des fonctions en S (sigmoïdes) ou des fonctions gaussiennes. Ces types de fonctions offrent une continuité et une dérivabilité sur leur domaine, les rendant ainsi appropriées pour une gamme d'applications, telles que l'intelligence artificielle, le contrôle de processus et la modélisation.

III.8. Opérateurs de la logique floue

On étudie les opérations de base sur les ensembles flous. Dans la suite, on suppose que A et B sont des ensembles flous définis dans le même univers de discours U ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance.

Il existe quatre opérateurs de base pour gérer les variables floues : l'intersection, l'union, complément et implication. Mais les deux opérateurs les plus souvent utilisés dans la commande par la logique floue : opérateur (ET) et opérateur (OU).

➤ **Opérateur (ET) :** L'opérateur « ET » correspond l'intersection, on a donc :

$$C = A \cap B = A \text{ ET } B$$

Dans la logique floue, l'intersection est réalisée dans la plupart des cas par la formulation de minimum, appliqué aux fonctions d'appartenances $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des ensembles A et B, à savoir :

$$\mu_C(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

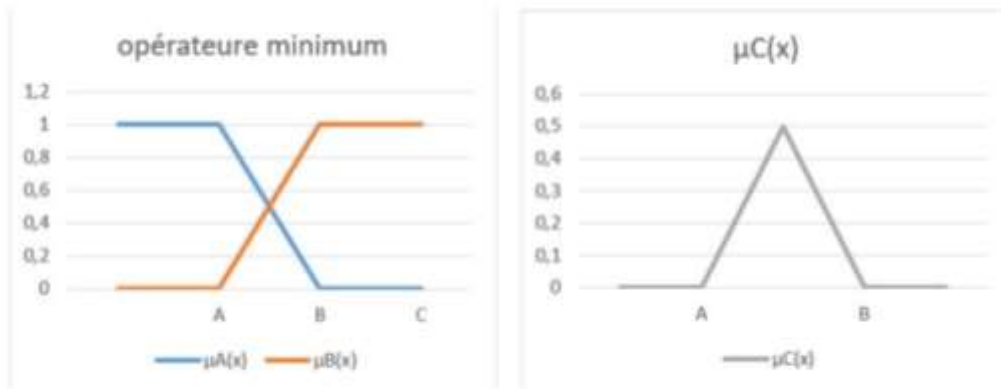


Figure III.6 : Opérateur (ET)

➤ **Opérateur (OU) :** L'opérateur « OU » correspond à l'union, on a donc

$$C = A \cup B = A \text{ ou } B.$$

La réalisation de l'union se fait en générale par la formulation du maximum.

$$\mu_C(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

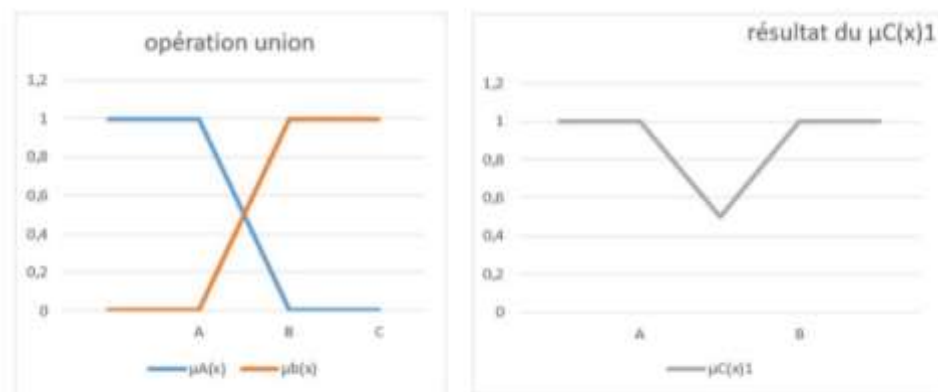


Figure III.7 : Opérateur (OU)

III.9. Commande Floue (contrôleur flou)

L'objectif de la commande est de moduler le processus pour obtenir un comportement souhaité. Du point de vue de l'automatisation, cela nécessite de développer une loi de commande qui assure la stabilité et la robustesse du système face aux perturbations. Pour cela, un contrôleur flou est employé, présentant une configuration de base. La structure de base d'un contrôleur flou se compose de quatre parties

Principales, un bloc de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et un bloc de défuzzification :

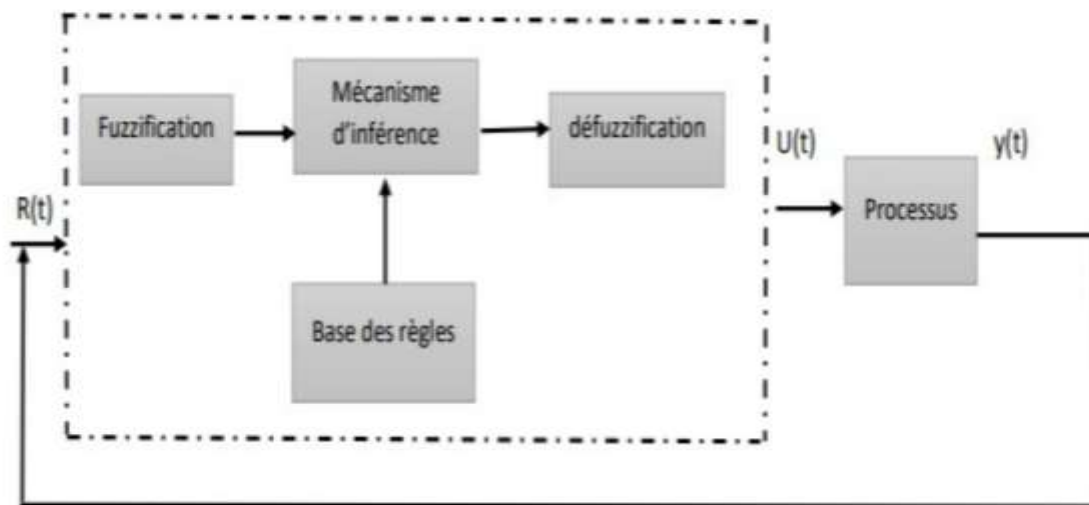


Figure III.8 : Structure d'un contrôleur flou

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont, en général, les grandeurs de sortie du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes appliquées au processus.

La configuration de base du contrôleur flou comprend quatre parties :

- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- La Base de connaissances.
- Le Moteur d'inférence floue.
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

III.10. Fuzzification

Est l'étape de conversion des entrées numériques en groupes obscurs dans le systèmes obscur (en degré d'appartenance flou par évaluation d'une fonction d'appartenance. On propose maintenant trois fuzzifier : Fuzzifier singleton, Gaussien flou et triangulaire flou [14].

- **Fuzzification d'une variable numérique :**

Pour fuzzifier une variable numérique, il faut donner :

- L'univers de discours, c'est-à-dire la plage de variations possibles des entrées et des sorties.
- Une répartition en classe floue de cet univers.
- Les fonctions d'appartenance de chacune de ces classes.

III.10.1. Base de règles

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

- D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de Normalisation.
- La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de réglés : Si « condition » Alors conséquences.

III.10.2. Inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision, en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur OU lie les différentes réglés. A cause de l'empîement des fonctions d'appartenances, en général deux ou plusieurs règles sont activées en même temps. Ce fait doit être pris en considération lors de la réalisation de l'opérateur OU [15].

Il existe plusieurs possibilités pour réaliser ces opérateurs qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit alors la notion de méthode d'inférence. Elle détermine la réalisation des différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière. Pour le réglage par logique floue, on utilise en général une des méthodes suivantes :

➤ **Méthode d'inférence max-min (Mamdani) :**

C'est la méthode d'inférence floue la plus courante. Cette méthode a été parmi les premiers systèmes de contrôle construits en utilisant la théorie des ensembles flous. Il a été proposé par Mamdani (1975) comme une tentative de contrôler une combinaison de machine à vapeur et de chaudière en synthétisant un ensemble de règles de contrôle linguistique, obtenues auprès d'opérateurs humains expérimentés. Pour chaque règle, on obtient la fonction d'appartenance partielle par la relation :

$$\mu_{Ri}(xR) = \min(\mu_{Ai}(xR), \mu_{Bi}(xR)); i = 1, 2, \dots, m \tag{III.4}$$

La fonction d'appartenance résultante est alors donnée par :

$$\mu_{Res}(xR) = \max(\mu_{R1}(xR), \mu_{R2}(xR), \dots, \mu_{Rm}(xR)) \tag{III.5}$$

III.10.3. Agrégation des règles

L'agrégation des règles implique que le niveau d'activation d'une règle dépend des conditions qui la composent. En cas d'activation simultanée de plusieurs règles, l'agrégation se fait en prenant en compte le degré d'activation de chacune pour obtenir le résultat de la conséquence.

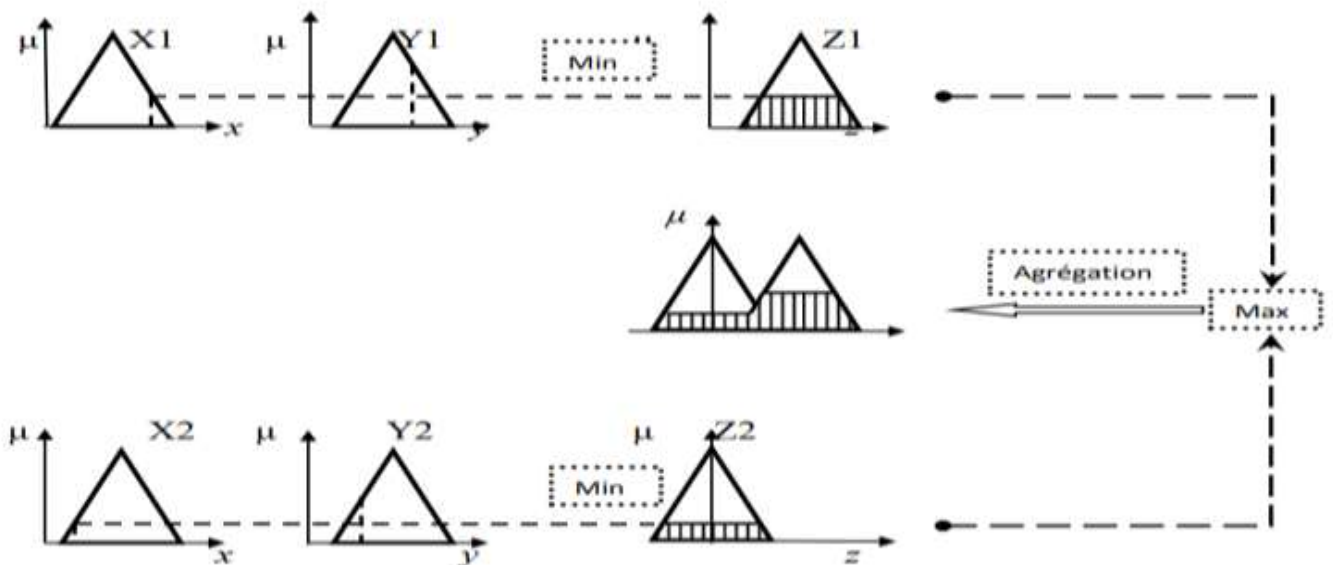


Figure III.9 : Agrégation des règles

➤ **Méthode d'inférence max-prod (Larsen) :**

Les systèmes flous TS emploient des fonctions linéaires de variables d'entrée comme implémentées en conséquence dans le système neuronal-flou.

Pour chaque règle, la fonction d'appartenance partielle $\mu_{Ri}(xR)$ est donnée par la relation :

$$\mu_{Ri}(xR) = (\mu_{Ai}(xR) * \mu_{Bi}(xR)) ; i = 1, 2, \dots m \quad (\text{III.6})$$

La fonction d'appartenance résultante est alors donnée par :

$$\mu_{Res}(xR) = \max(\mu_{R1}(xR), \mu_{R2}(xR), \dots \mu_{Rm}(xR)) \quad (\text{III.7})$$

➤ **Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno) :**

Dans cette méthode, le conséquent de chaque règle floue est représenté par un ensemble flou avec une fonction d'appartenance monotone [12].

En toute généralité, on obtient la fonction d'appartenance partielle $\mu_{Ri}(xR)$ de chaque règle par la relation :

$$\mu_{Ri}(xR) = (\mu_{Ai}(xR) * \mu_{Bi}(xR)) ; i = 1, 2, \dots m \quad (\text{III.8})$$

La fonction d'appartenance résultante est donnée par :

$$\mu_{Res}(xR) = \sum (\mu_{R1}(xR), \mu_{R2}(xR), \dots \mu_{Rm}(xR)) / m \quad (\text{III.9})$$

Où m est le nombre de règles intervenant dans l'inférence.

III.11. Défuzzification

Si le processus d'occultation est la porte d'entrée du monde logique mystérieux, alors le processus de décompression en est la porte de sortie. Grâce à ce processus, les valeurs linguistiques ambiguës sont converties en valeurs numériques qui sont faciles à gérer pour les ordinateurs et les machines en général [16].

Les Stratégies de défuzzification les plus couramment employées sont :

- Méthode de centre de gravité.
- Méthode du maximum.
- Méthode de la moyenne des maximas.

➤ **La méthode du centre de gravité :**

Le défuzzifier du centre de gravité spécifie y^* comme centre de la zone couverte par la fonction d'appartenance de B' peut-être déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$y^* = \int \frac{yuB'(y)dy}{uB'(y)dy} \quad (\text{III.10})$$

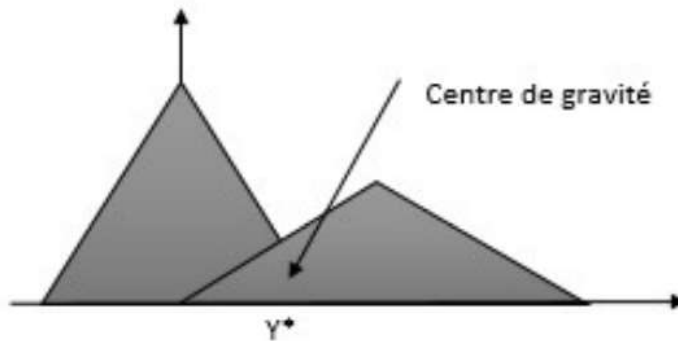


Figure III.10 : Représentation du centre de gravité

On utilise cette méthode généralement en commande floue à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

➤ **Méthode du maximum :**

La méthode du maximum simple, rapide et facile, mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie. La commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

➤ **Méthode de la moyenne des maxima :**

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale, est plutôt employée lorsqu'il s'agit de discriminer une valeur de sortie. Cette valeur est fournie par l'expression :

$$y^* = (\inf(M) + \sup(M))/2 \quad (\text{III.11})$$

La comparaison entre les deux méthodes maximum et centre de gravité est donnée dans le tableau (III.1)

Méthode	Centre de gravité	Maximum
Plausibilité	Oui	Oui
Simplicité de calcul	Non	Oui
Continuité	Oui	Non

III.12. Caractéristiques structurelles

Ces caractéristiques englobent tous les aspects de la structure du système d'inférence floue qui influencent son fonctionnement, notamment :

- Le choix des fonctions d'appartenance utilisées pour définir chaque terme linguistique (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne, sigmoïde, etc.).
- Le nombre de termes linguistiques définis pour chaque variable.
- Le nombre de règles générées pour le système.
- La technique de défuzzification utilisée pour convertir les résultats flous en valeurs numériques.

III.13. Caractéristiques paramétriques

Une fois la structure du système déterminée, les caractéristiques paramétriques portent sur les valeurs numériques des sous-ensembles qui le composent, notamment :

- Les paramètres des fonctions d'appartenance des variables d'entrée.
- Les paramètres des fonctions d'appartenance des variables de sortie.

La mise en œuvre d'un système flou repose généralement sur une technique d'induction de règles, impliquant deux étapes principales : la génération de règles et l'optimisation du système, à la fois sur le plan paramétrique et structurel. L'optimisation paramétrique vise à ajuster les fonctions d'appartenance des variables, tandis que l'optimisation structurelle comprend la sélection des variables d'entrée et la réduction de la base de règles pour une meilleure efficacité du système.

➤ Optimisation paramétrique :

L'optimisation paramétrique vise à déterminer les ensembles de fonctions d'appartenance pour les prémices et les conséquences des règles floues. Traditionnellement, cette optimisation est réalisée par des ajustements itératifs. Cependant, ces dernières années, de nouvelles approches ont émergé, exploitant des méthodes

numériques telles que les techniques hybrides neuro-floues qui intègrent des algorithmes d'apprentissage, ainsi que celles utilisant les algorithmes génétiques.

➤ **Optimisation structurelle :**

L'optimisation structurelle comprend deux phases distinctes :

- Dans la première phase, il s'agit de sélectionner les variables d'entrée appropriées parmi celles qui décrivent le système. Cette sélection vise à identifier les variables qui peuvent être efficacement utilisées en tant qu'entrées du système flou.
- La deuxième phase consiste à réduire la base de règles, en éliminant les termes redondants. Cette action permet de diminuer le temps de calcul et d'optimiser l'utilisation du système flou.

Dans de nombreuses applications, les bases de données sont souvent volumineuses. Par conséquent, la conception automatique des systèmes d'inférence floue doit prendre en compte cette volumétrie de données pour assurer une performance optimale structurelle.

III.14. Domaines d'application

Les domaines d'application de la logique floue sont multiples, on peut citer :

- Automatismes :
 - Automatismes dans les appareils grand public.
 - Automatismes industriels.
 - Automatismes d'entreprise de transport.
- Informatique :
 - Programmatiques et développement.
 - Intelligence artificielle et systèmes experts.
 - Mathématiques appliquées.
 - Recherche opérationnelle.

III.15. Avantages et Inconvénients

- **Avantages :**

- Le non nécessite d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus.
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe.
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus.
- La simplicité de définition et de conception. .
- Robustesse vis-à-vis les incertitudes de modélisation.

- **Inconvénients :**

- Aucune méthode formelle pour l'ajustement.
- L'approche artisanale et non systématique.
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas.
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse, . . .
etc.

III.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes théoriques des techniques de la commande intelligente basées sur la logique floue. Tout d'abord nous avons donné quelques définitions, après nous avons présenté la structure générale de la commande floue et ses étapes (avec les méthodes les plus connues). Ensuite, Nous avons terminé notre chapitre par un ensemble des domaines d'application.

Chapitre IV :
**Commande par mode glissant-
flou du robot flexible**

IV.1. Introduction

Ce chapitre aborde le défi du contrôle précis et robuste des robots flexibles en proposant une stratégie de contrôle hybride innovante. Cette stratégie combine les avantages du contrôle par mode glissant et du contrôle par logique floue, surmonte les limites des méthodes traditionnelles et offre des performances supérieures en termes de précision, de stabilité et de robustesse face aux incertitudes paramétriques et aux perturbations.

Dans le domaine du contrôle des systèmes non linéaires, l'approche par logique floue a acquis une place prépondérante grâce à sa capacité à intégrer de manière systématique les connaissances linguistiques humaines dans la conception des contrôleurs. Les contrôleurs basés sur la logique floue sont largement utilisés dans de nombreuses applications et produisent d'excellents résultats.

Pour développer cette solution, nous avons utilisé MATLAB Simulink, un outil important qui nous permet de modéliser et de simuler des systèmes de contrôle avec une grande précision. En tirant parti des capacités avancées de Simulink, nous sommes en mesure d'analyser en profondeur les performances des stratégies hybrides tout en considérant divers scénarios et conditions opérationnelles.

IV.2. Mise en œuvre de la loi de commande par mode de glissement

- Dans cette étude, la base étudiée est composée d'un bras rigide relié par une articulation souple. Cette articulation souple est modélisée par un ressort linéaire.
- Le robot flexible est représenté par la figure (I.3). Les valeurs numériques du système sont représentées par le tableau (I.1) et le modèle dynamique par l'équation (I.1).
- La commande du robot à articulation flexible est effectuée par contrôle par mode glissant, afin de répondre aux exigences du cahier des charges et d'améliorer la régulation et le suivi de trajectoire, tout en réduisant les vibrations de la liaison.
- Les variables d'entrée de contrôleur de glissement sont : l'erreur de la position angulaire (θ) et sa dérivée, l'erreur de l'angle de déflexion (α) et sa dérivée.
- La variable de sortie de ce régulateur est le signal de commande du notre système.
- La mise en œuvre de la loi de commande par mode glissant est effectuée par le logiciel Matlab/Simulink.

IV.3. Commande par mode glissant (MG)

La commande par mode glissant (ou contrôle par mode glissant) est une technique de contrôle robuste utilisée dans les systèmes dynamiques pour gérer les incertitudes et les non-linéarités. Appliquée à un robot à articulation flexible, cette méthode permet de garantir des performances élevées malgré les perturbations et les variations du modèle [16] et [19].

La synthèse de la loi de commande, donnée par la formule (II.2), par modes glissants du bras manipulateur dont le modèle dynamique est donné par l'équation (I.1), est donnée comme suit :

On a donc :

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (\text{IV.1})$$

IV.3.1. Calcul de la commande

La loi de commande par mode glissant contient deux termes et elle donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_{eq} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (\text{IV.2})$$

La commande discontinue $\mathbf{D}\mathbf{u}$ est définie par :

$$\mathbf{D}\mathbf{u} = -k \text{sign } \mathbf{s}(\boldsymbol{\theta}) \quad (\text{IV.3})$$

k est une constante positive.

La commande équivalente \mathbf{U}_{eq} est donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{U}_{eq} = - \left[\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (\text{IV.4})$$

IV.3.2. Calcule de la commande équivalente

La relation (II.6) s'écrit comme suit :

$$\mathbf{s} = \lambda \mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} \quad (\text{IV.5})$$

Et

$$\dot{\mathbf{s}} = \lambda \dot{\mathbf{e}} + \ddot{\mathbf{e}} \quad (\text{IV.6})$$

En régime glissant

$$\mathbf{s}(\boldsymbol{\theta}) = \dot{\mathbf{s}}(\boldsymbol{\theta}) = \ddot{\mathbf{s}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0} \quad (\text{IV.7})$$

Donc

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \lambda(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_d) + (\ddot{\boldsymbol{\theta}} - \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d) = \mathbf{0} \\ \Rightarrow \ddot{\boldsymbol{\theta}} &= \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \lambda(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\boldsymbol{\theta}}_d) \end{aligned} \quad (\text{IV.8})$$

D'autre part et d'après l'équation (I.21), on a :

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{K_{stiff}}{J_{eq}} \mathbf{x}_2 + \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m)}{(J_{eq} R_m)} \mathbf{x}_3 + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{eq} R_m} \mathbf{u} \quad (\text{IV.9})$$

Alors on remplace \mathbf{U} par la commande \mathbf{U}_{eq} dans l'équation, on obtient :

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{K_{stiff}}{J_{eq}} \boldsymbol{\alpha} + \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m)}{(J_{eq} R_m)} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{eq} R_m} \mathbf{U}_{eq} \quad (\text{IV.10})$$

D'après les deux équations (IV.8) et (IV.9) : on aura :

$$\ddot{\theta}_d - \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) = \frac{K_{stiff}}{J_{eq}} \alpha + \frac{(-\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m)}{(J_{eq} R_m)} \dot{\theta} + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{J_{eq} R_m} U_{eq} \quad (IV.11)$$

D'où :

$$U_{eq} = \left(\frac{J_{eq} R_m}{n_m n_g k_t k_g} \right) \left(\left(\frac{n_m n_g k_t k_m k_g^2 + B_{eq} R_m}{J_{eq} R_m} - \lambda \right) \dot{\theta} + \lambda \dot{\theta}_d + \ddot{\theta}_d - \frac{k_s}{J_{eq}} \alpha \right) \quad (IV.12)$$

Donc on peut déduire la commande la position angulaire θ est donnée comme suit :

$$u = \left(\frac{J_{eq} R_m}{n_m n_g k_t k_g} \right) \left(\left(\frac{n_m n_g k_t k_m k_g^2 + B_{eq} R_m}{J_{eq} R_m} - \lambda \right) \dot{\theta} + \lambda \dot{\theta}_d + \ddot{\theta}_d - \frac{k_s}{J_{eq}} \alpha \right) - k \text{sign}(s(\theta)) \quad (IV.13)$$

Le vecteur de commande par mode glissant assure que la position angulaire θ de l'arbre du moteur suit la trajectoire désirée, en étant robuste face aux perturbations et incertitudes.

Le schéma de simulation suivant représente la commande par mode glissant.

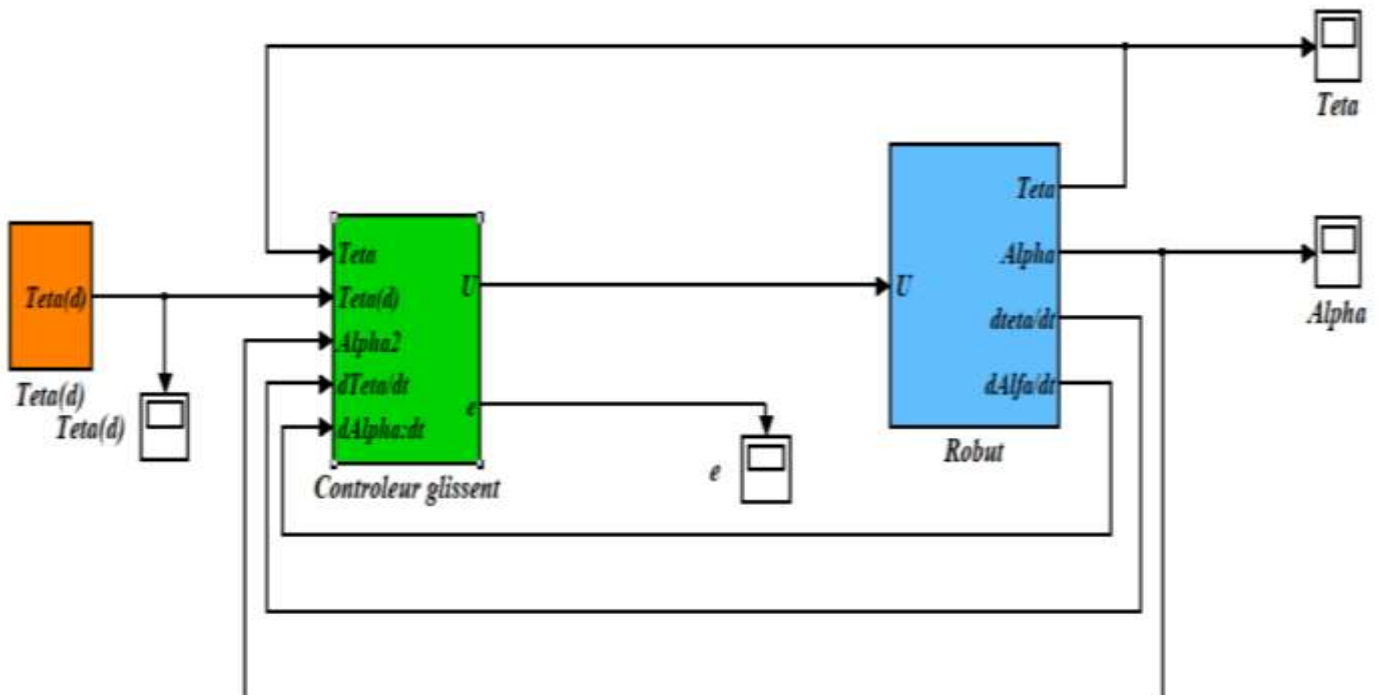


Figure IV.1 : Schéma bloc de la commande par mode glissant

IV.3.3. Résultats des simulations et interprétation

Nous mettrons en lumière la stratégie de commande par mode glissant classique pour aborder les problèmes de suivi de trajectoire et le comportement vibratoire d'un robot manipulateur à articulation flexible. Le contrôleur par mode glissant doit garantir un suivi précis de la position angulaire souhaitée et assurer que l'angle de déflexion converge vers zéro. Afin de démontrer l'efficacité de cette stratégie et d'illustrer ses inconvénients, nous réaliserons des tests de simulation sur MATLAB/Simulink, en suivi de trajectoire.

- La trajectoire désirée (θ_d):

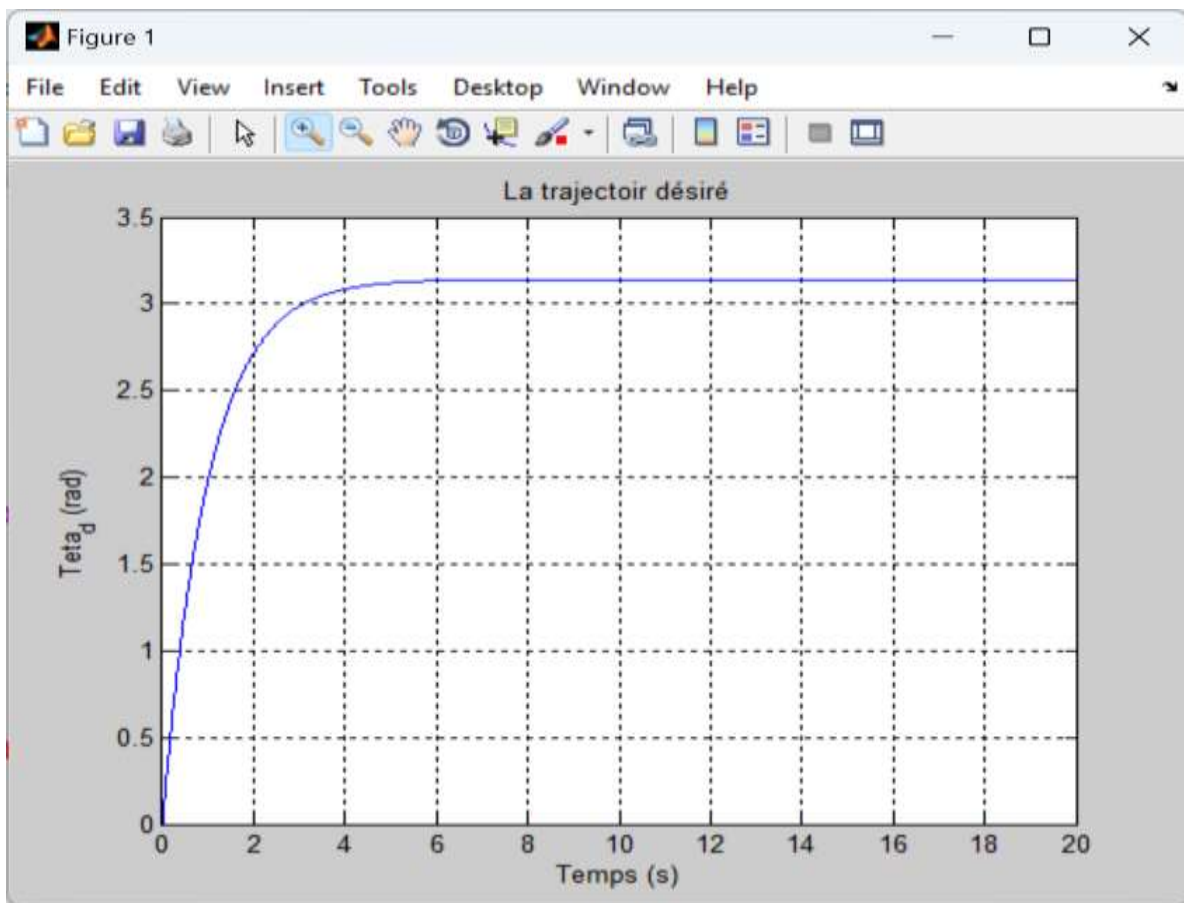


Figure IV.2 : Trajectoire désirée

- La trajectoire (θ):

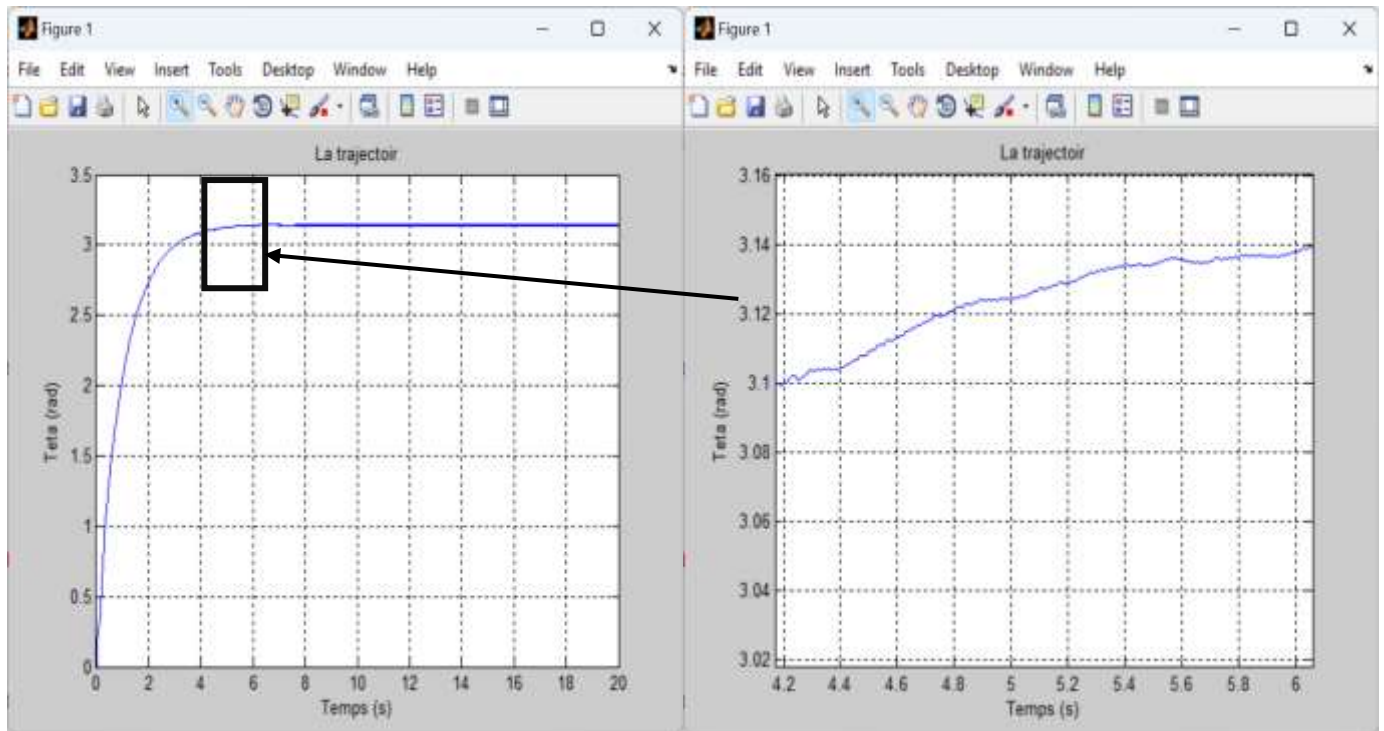


Figure IV.3 : Trajectoire avec la commande par mode glissant

D'après les résultats de simulation, nous constatons une très bonne poursuite de trajectoire. Le robot effectue un mouvement de rotation depuis sa position initiale jusqu'à sa position finale, avec un temps de réponse de 2,94 secondes et un dépassement très faible.

- L'angle de déflexion (α):

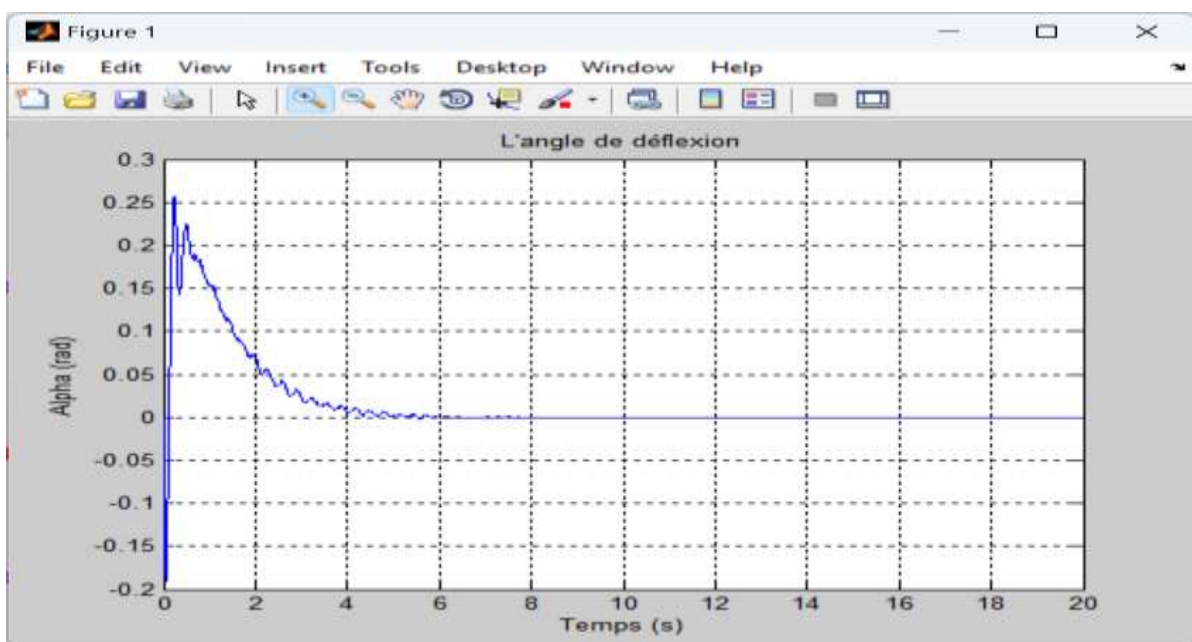


Figure IV.4 : Angle de déflexion

Cette figure montre l'évolution de l'angle de déflexion α en fonction du temps. Pour la phase initiale 0 à 2 secondes, le système réagit rapidement avec une réduction de l'angle de déflexion et un dépassement négatif (-0.1 rad), suivi d'oscillations. La phase de stabilisation 2 à 4 secondes où les oscillations s'amortissent progressivement et le système tend vers la valeur de consigne (0). La phase finale (après 4 secondes) où notre système se stabilise autour de la valeur de consigne avec des oscillations négligeables.

- **L'erreur de position angulaire :**

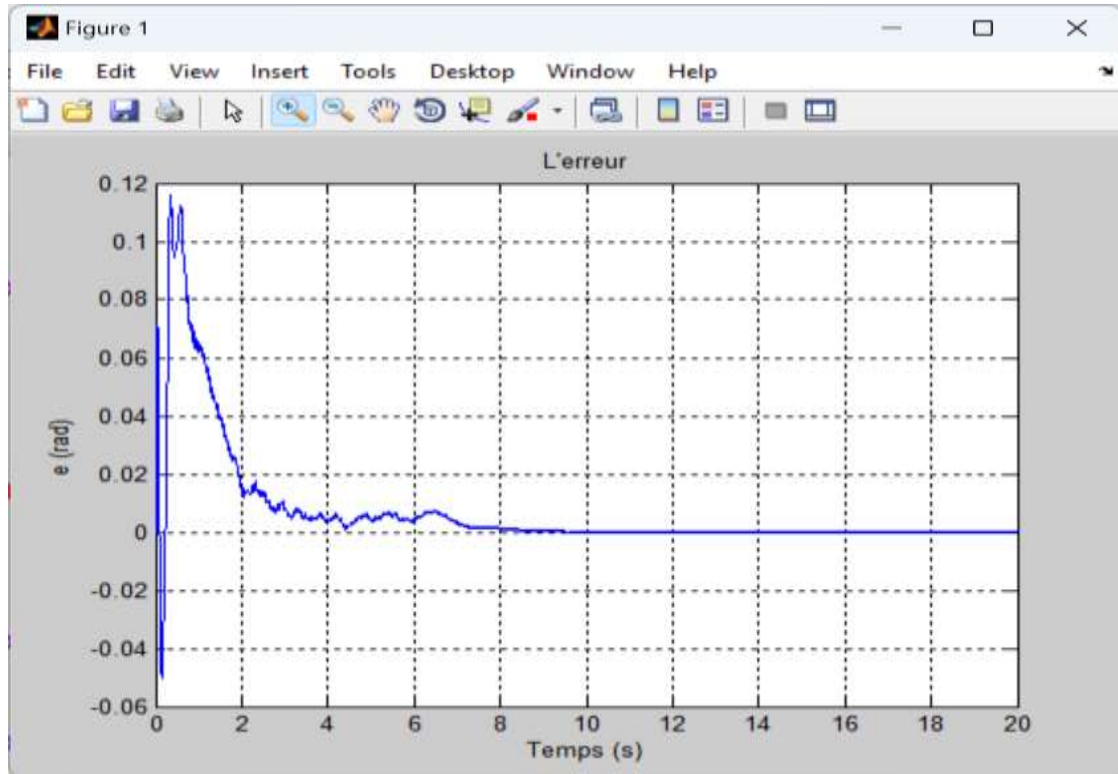


Figure IV.5 : Erreur de position angulaire

Cette allure représente l'erreur de position, elle montre que le système de contrôle en mode glissant est très efficace pour réduire rapidement les écarts initiaux et stabiliser la trajectoire du robot manipulateur flexible. L'erreur de position contient un dépassement maximal environ **(0.12 rad)**.

- Le dérivé de l'erreur :

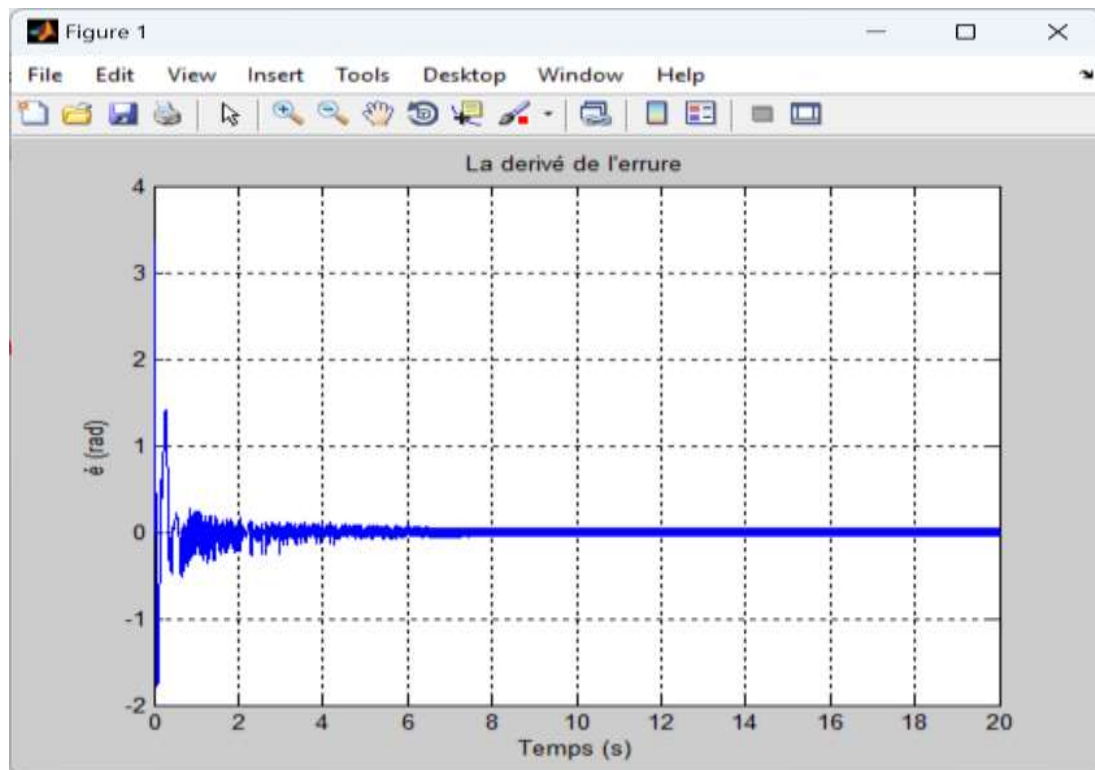


Figure IV.6: Dérivé de l'erreur

La figure IV.6 illustre l'erreur de vitesse. On voit bien que le contrôleur maintient le système à la vitesse désirée.

Le système montre initialement des oscillations rapides et significatives de la dérivée de l'erreur, ce qui signifie que l'erreur angulaire(e) change rapidement au début. Cependant, ces oscillations diminuent rapidement et la dérivée de l'erreur se stabilise à zéro, indiquant que l'erreur angulaire elle-même devient stable.

- La surface de glissement :

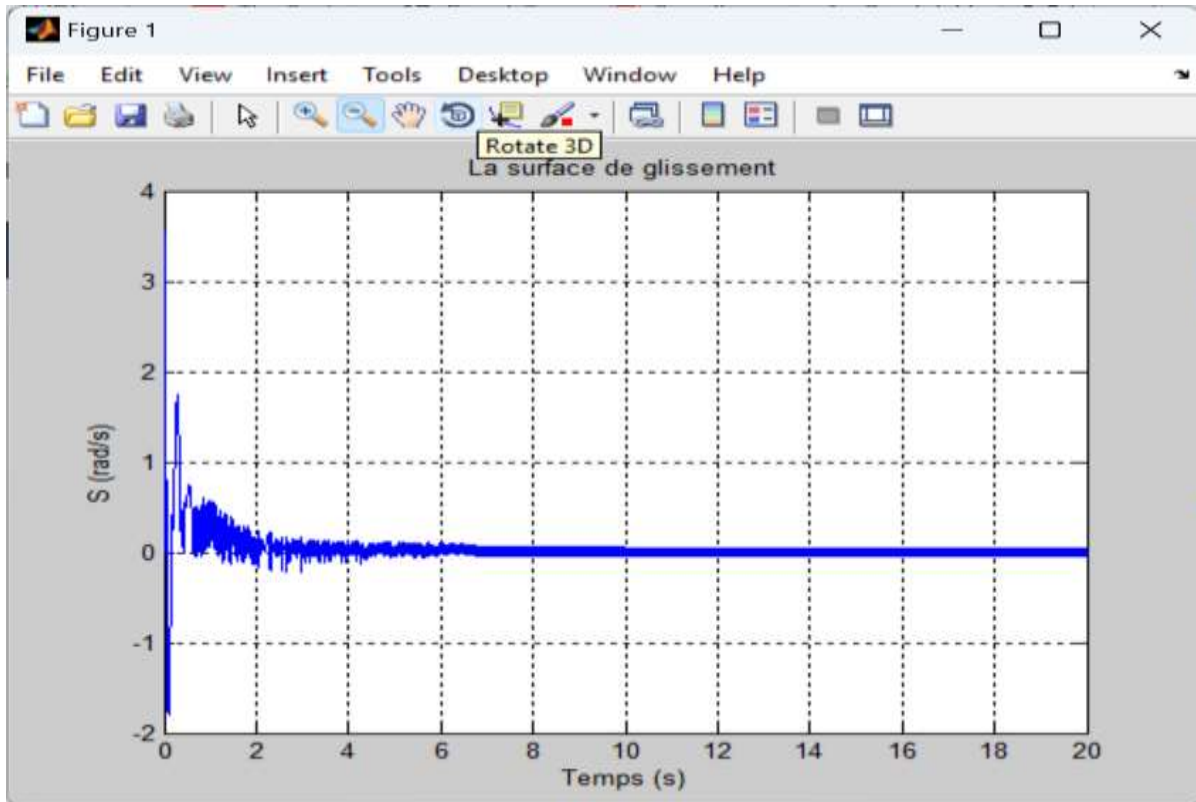


Figure IV.7 : Surface de glissement

Cette figure montre que le système de contrôle par mode glissant commence par corriger de grandes discordances entre l'état actuel et l'état désiré, puis stabilise le robot manipulateur sur la surface de glissement qui converge vers zéro, assurant ainsi un suivi précis de la trajectoire souhaitée.

- La commande U :

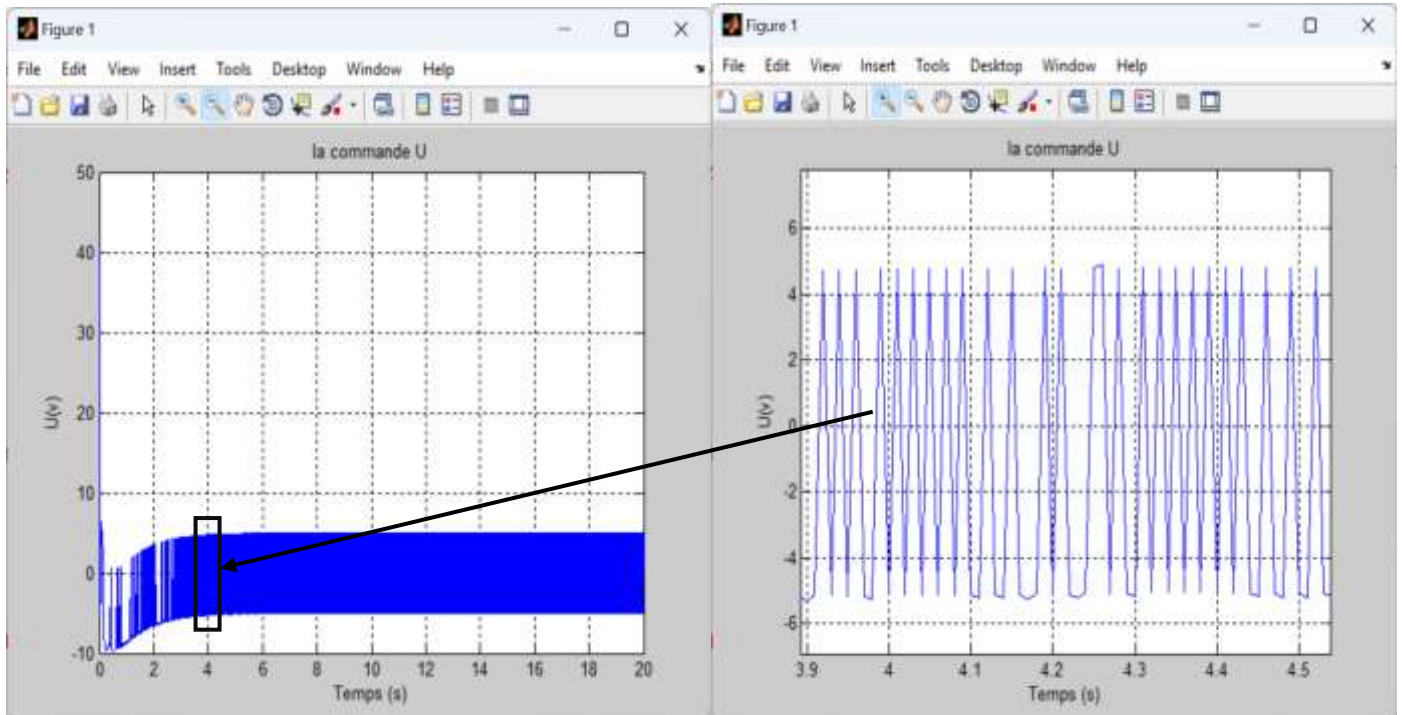


Figure IV.8 : Commande U

La commande U du manipulateur flexible en mode glissant montre des oscillations rapides caractéristiques du contrôle par mode glissant. Elle oscille autour de **zéro** avec une amplitude qui varie entre -5 V et +5 V pour maintenir l'état désiré avec une faible erreur. Cette allure met en évidence le phénomène de chattering, qui est le l'inconvénient majeure de la commande par mode glissant.

IV.4. Test de robustesse

IV.4.1. Introduction de perturbation et des variations paramétriques :

Nous avons introduit des variations paramétriques et une perturbation par un signal carré d'amplitude 3 ($A=3$) et d'une période 2s (8-6).

- La trajectoire :

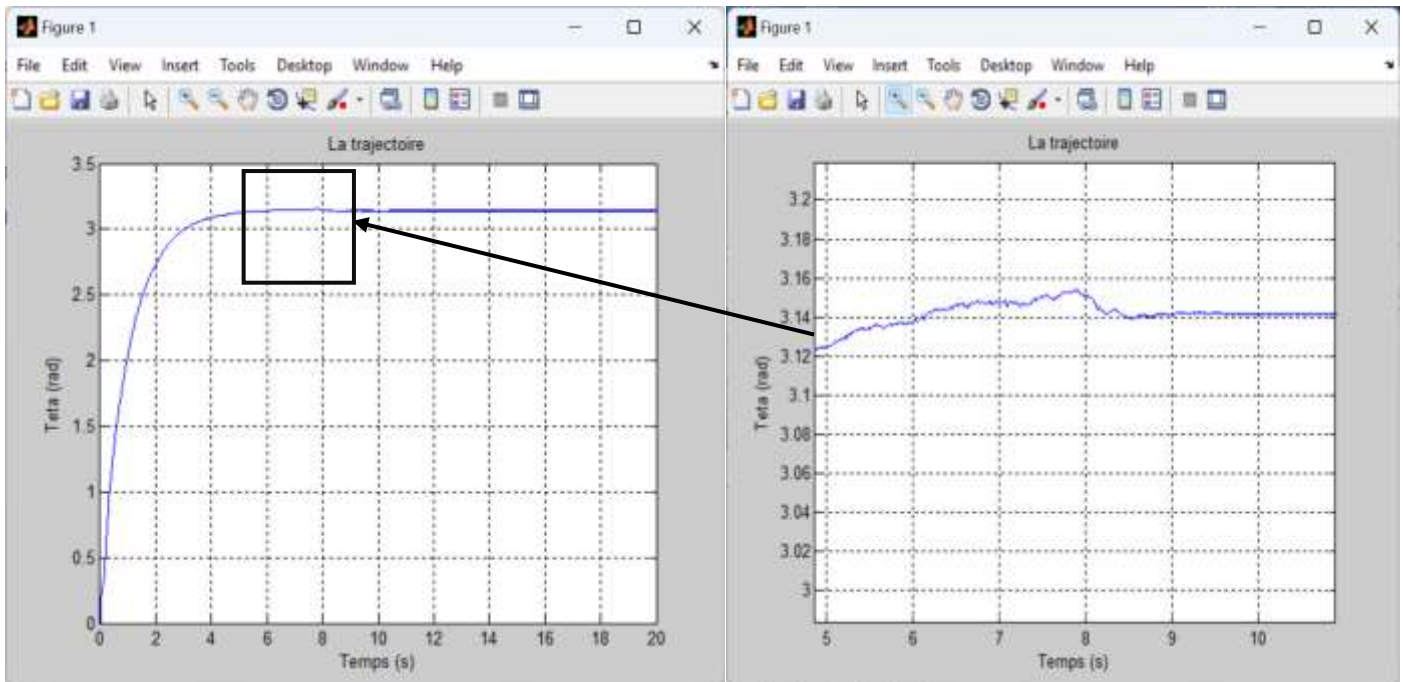


Figure IV. 9 : Trajectoire avec la commande par mode glissant et perturbation

Cette figure montre que le contrôle par mode glissant permet de suivre efficacement la trajectoire souhaitée et de compenser rapidement une perturbation externe et des variations paramétriques, ramenant notre système à sa trajectoire stable.

- L'angle de déflexion :

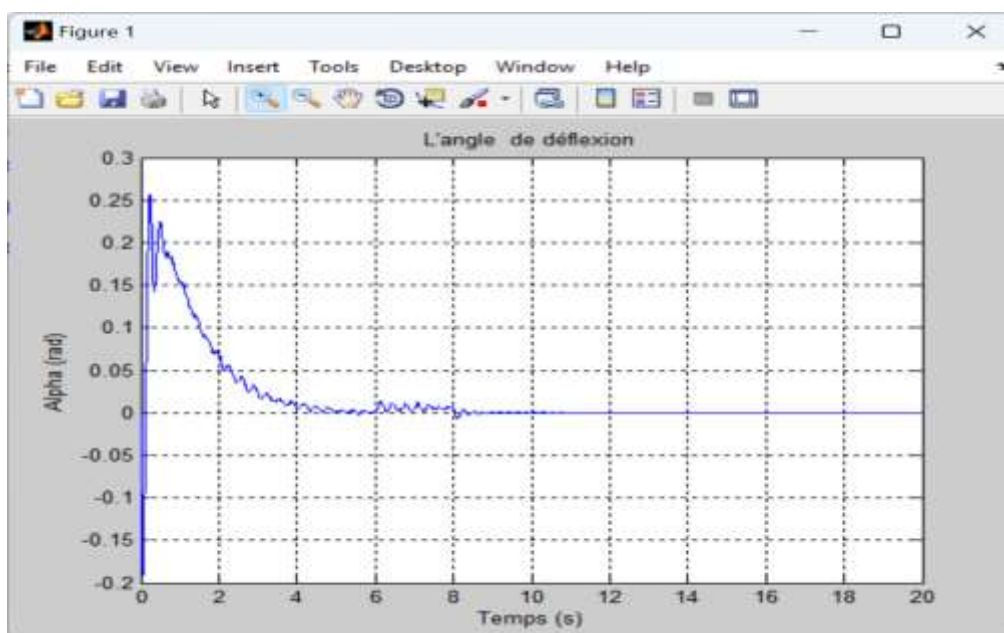


Figure IV.10 : Angle de déflexion

Dans cette figure, nous remarquons que le contrôleur par mode glissant permet de maintenir l'angle de déflexion α du manipulateur flexible proche de zéro, même en présence d'une perturbation significative. Le système est capable de compenser rapidement les déviations causées par la perturbation, assurant ainsi un bon suivi de trajectoire.

- **L'erreur de position angulaire :**

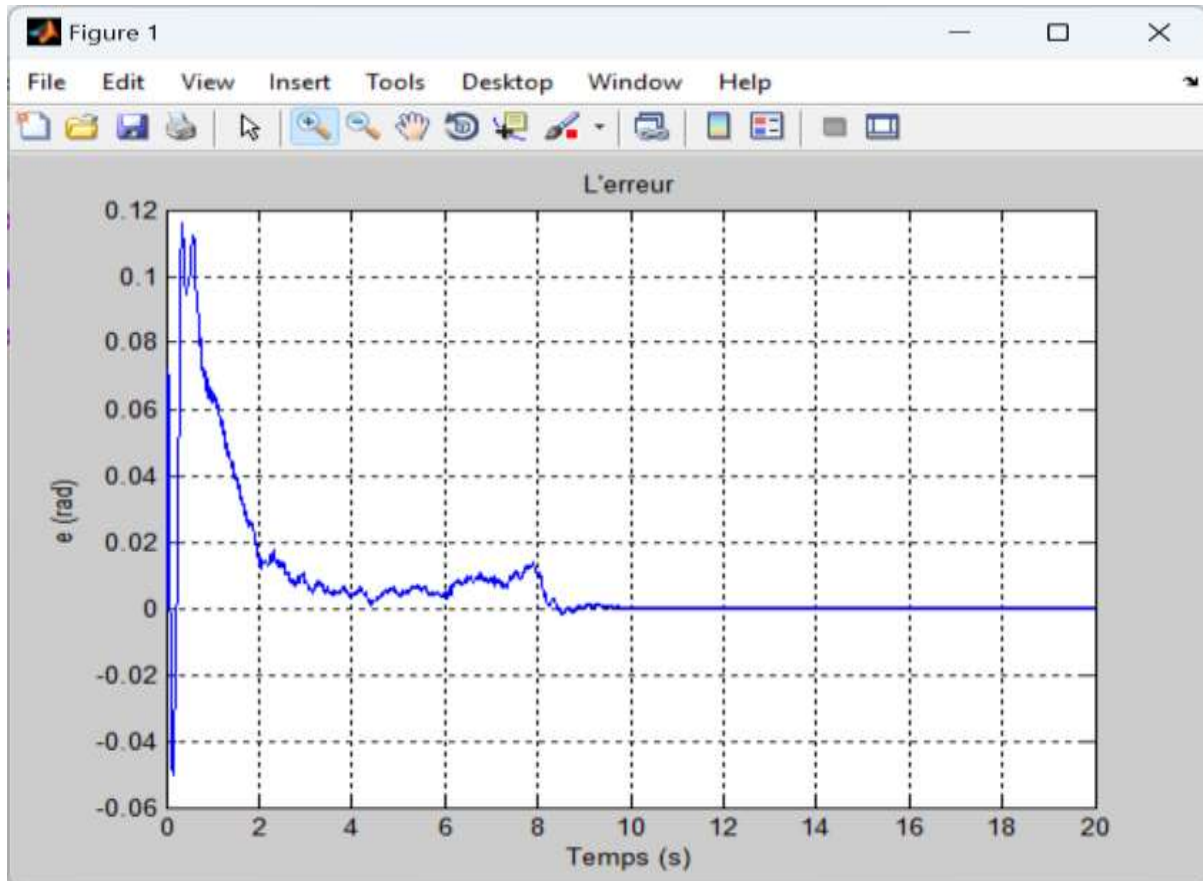


Figure IV.11 : Erreur de position angulaire

Cette figure vérifie que le contrôleur par mode glissant permet de maintenir une erreur très faible entre la trajectoire réelle du robot manipulateur flexible et la trajectoire désirée, même en présence d'une perturbation significative. Le système compense rapidement les écarts et assure une trajectoire stable et précise.

- Le dérivé de l'erreur :

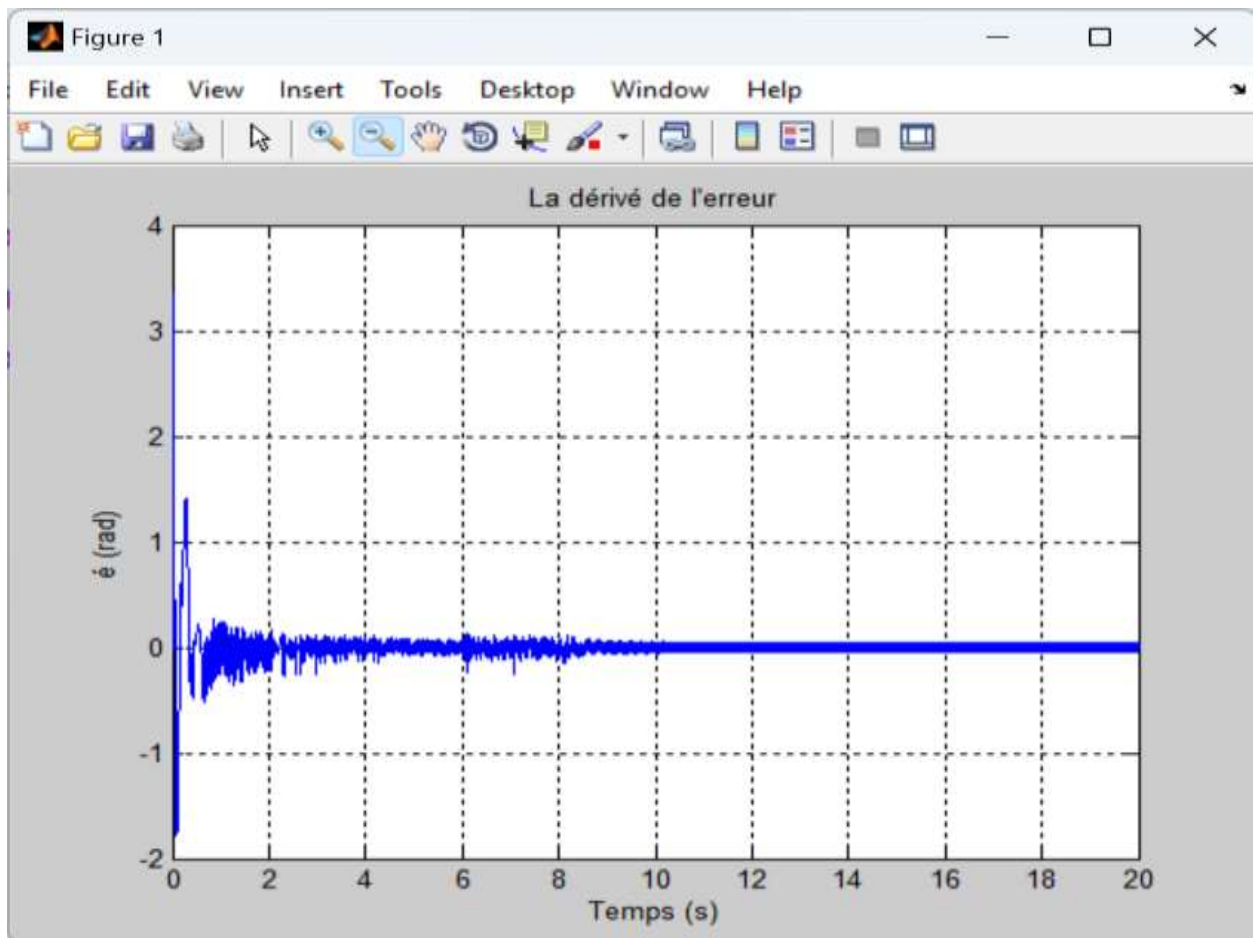


Figure IV.12 : Dérivé de l'erreur

Le contrôleur par mode glissant permet de maintenir la dérivée de l'erreur à un niveau faible et stable, même en présence d'une perturbation significative.

- La surface de glissement :

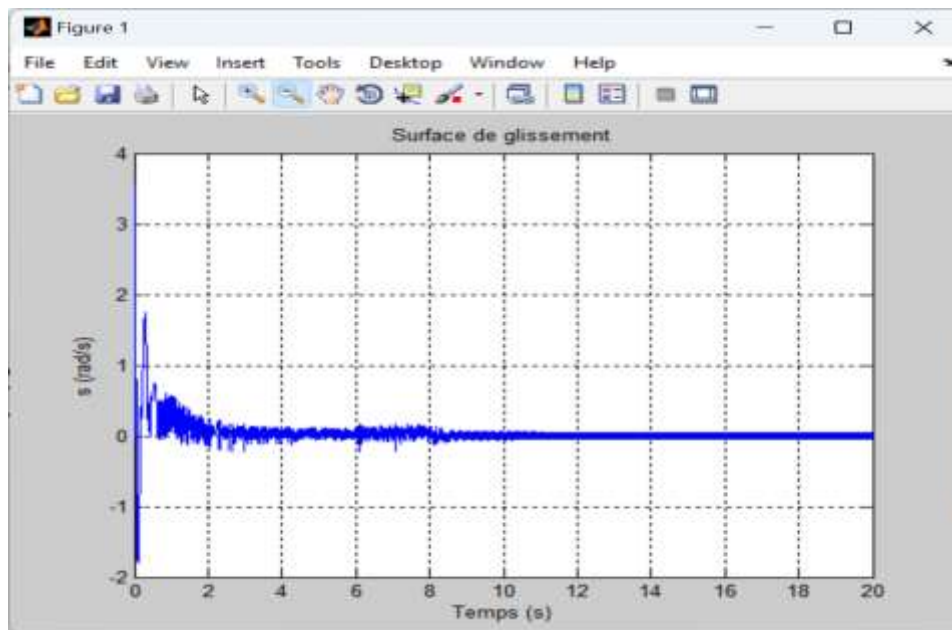


Figure IV.13 : Surface de glissement

Dans cette figure, nous observons que la convergence vers zéro de la surface de glissement est toujours maintenue.

- La commande U :

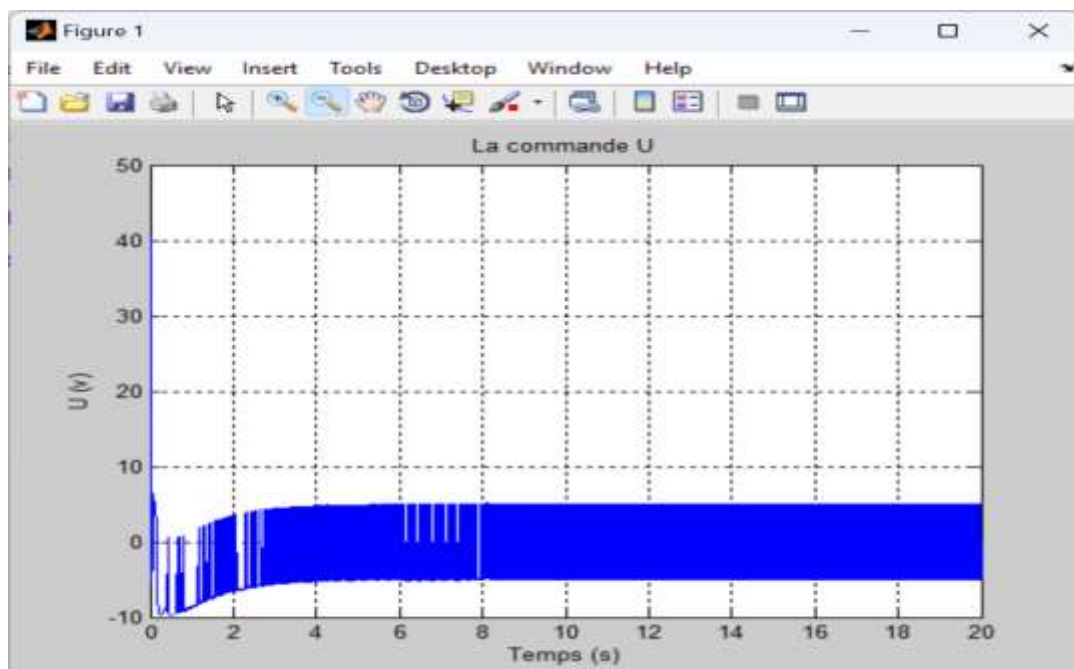


Figure IV.14 : Commande U

Cette figure illustre la robustesse de la commande par mode glissant. Au moment de l'application de la perturbation externe, nous observons la réaction rapide de la commande pour la compenser et assurer une trajectoire stable et précise pour le manipulateur.

IV.5. Commande par mode glissant-flou

IV.5.1 Conception du régulateur flou

Notre régulateur flou est de type Mamdani comportant deux entrées qui sont l'erreur de position (e) et sa dérivé (Δe), la variable de sortie du contrôleur est la commande discontinue du mode glissant.

- La figure montre le choix de la forme des fonctions d'appartenance pour deux entrées et une sortie, répartis sur l'univers de discours normalisé $[0,20]$.

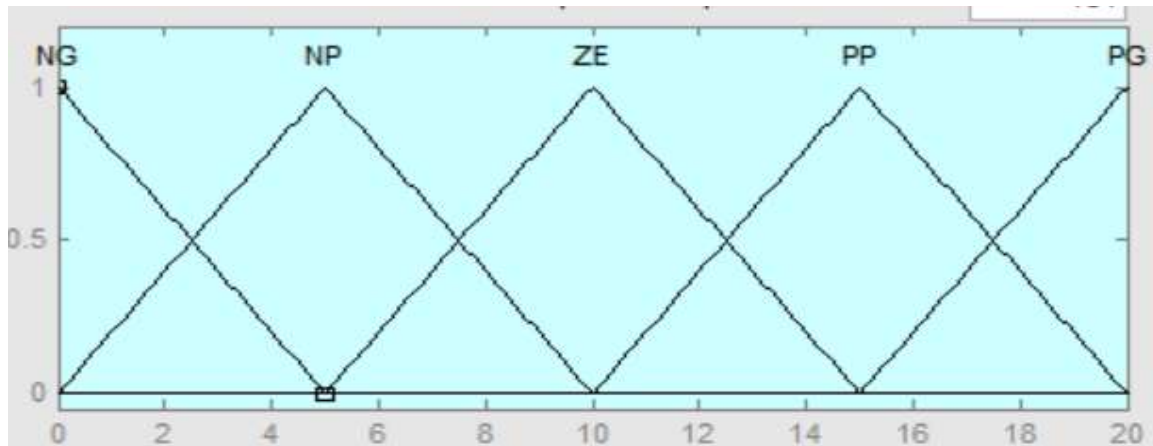


Figure IV.15 : Fonction d'appartenance

Avec :

NG : Négatif Grand

NP : Négatif Petit

ZE : Zéro

PP : Positif Petit

PG : Positif Grand

- les règles d'inférence [20, 21] :

1. Si (e est **NG**) et (\dot{e} est **ZE**) alors (u est **PG**)

2. Si (e est **NP**) et (\dot{e} est **ZE**) alors (u est **PP**)

3. Si (**e** est **NP**) et (**\dot{e}** est **PP**) alors (**u** est **ZE**)
4. Si (**e** est **ZE**) et (**\dot{e}** est **NG**) alors (**u** est **PG**)
5. Si (**e** est **ZE**) et (**\dot{e}** est **NP**) alors (**u** est **PP**)
6. Si (**e** est **ZE**) et (**\dot{e}** est **ZE**) alors (**u** est **ZE**)
7. Si (**e** est **ZE**) et (**\dot{e}** est **PP**) alors (**u** est **NP**)
8. Si (**e** est **ZE**) et (**\dot{e}** est **PG**) alors (**u** est **NG**)
9. Si (**e** est **PP**) et (**\dot{e}** est **NP**) alors (**u** est **ZE**)
10. Si (**e** est **PG**) et (**\dot{e}** est **ZE**) alors (**u** est **NP**)
11. Si (**e** est **PG**) et (**\dot{e}** est **ZE**) alors (**u** est **NG**)

• Le bloc de simulation est donné comme suit :

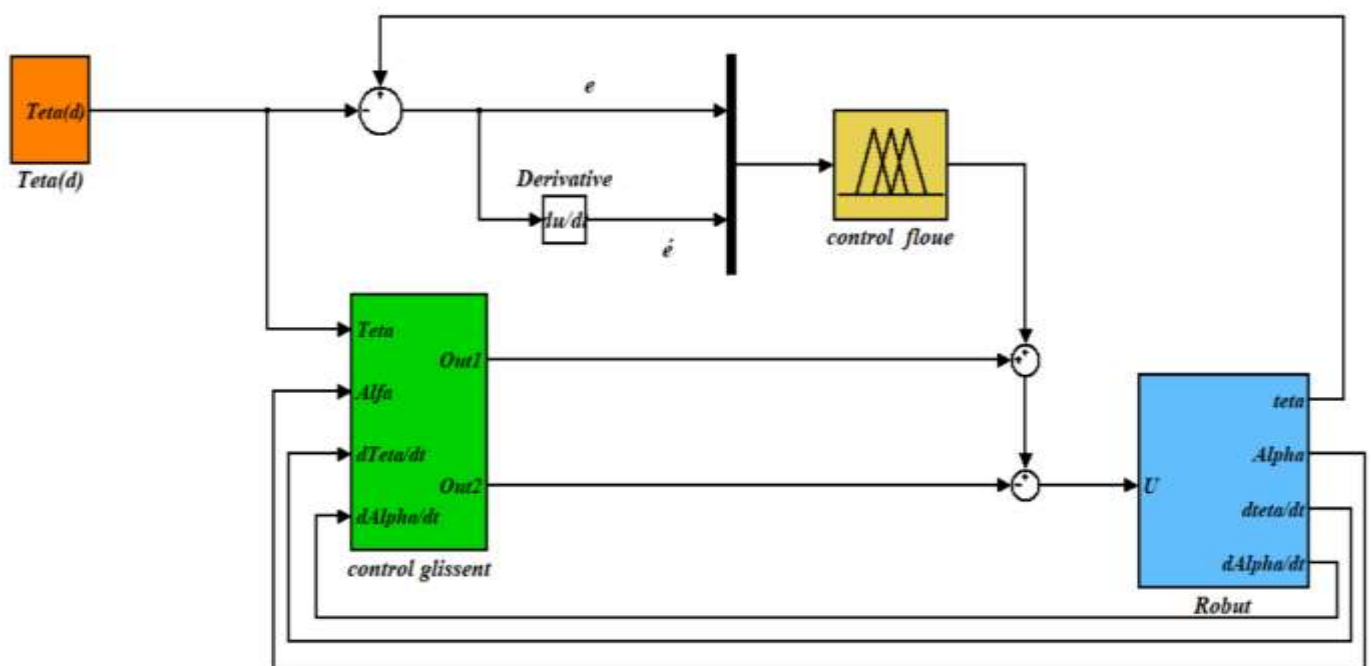


Figure IV.16 : Schéma bloc de la commande par mode glissant –flou

IV.5.2. Résultats des simulations

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter les résultats de simulation après remplacement de la commande discontinue des modes glissants par un système flou.

- **La trajectoire désiré et Trajectoire :**

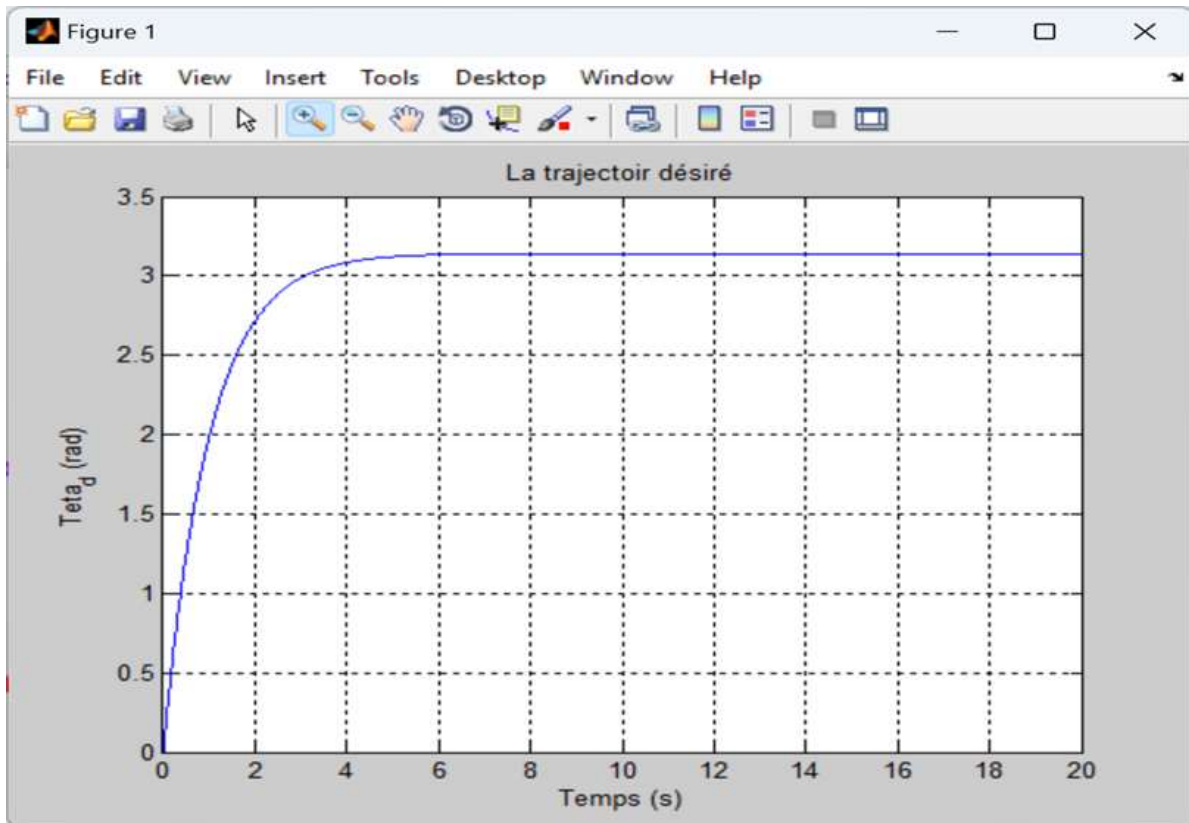


Figure IV.17 : Trajectoire désirée

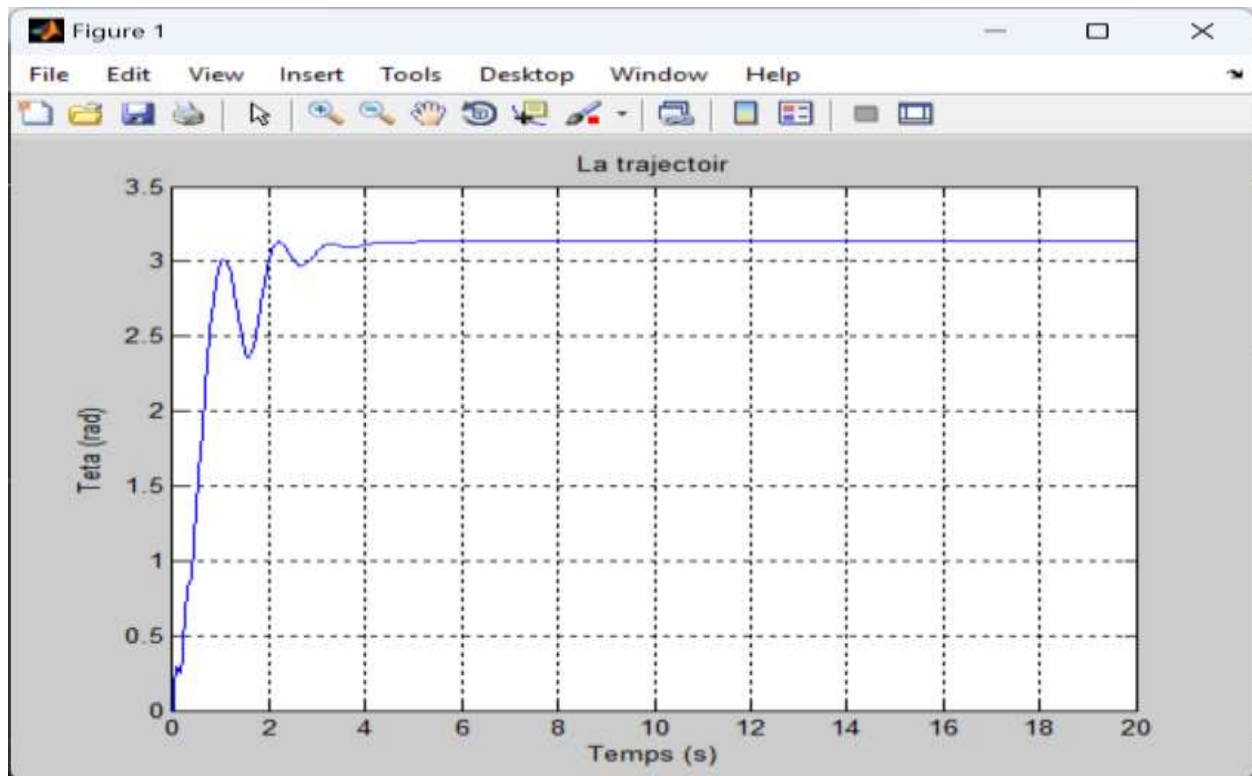


Figure IV.18 : Trajectoire avec commande par mode glissant-flou

Nous pouvons voir que la position présente un meilleur suivi de la trajectoire désirée avec la commande par mode glissant-flou.

- L'angle de déflexion :

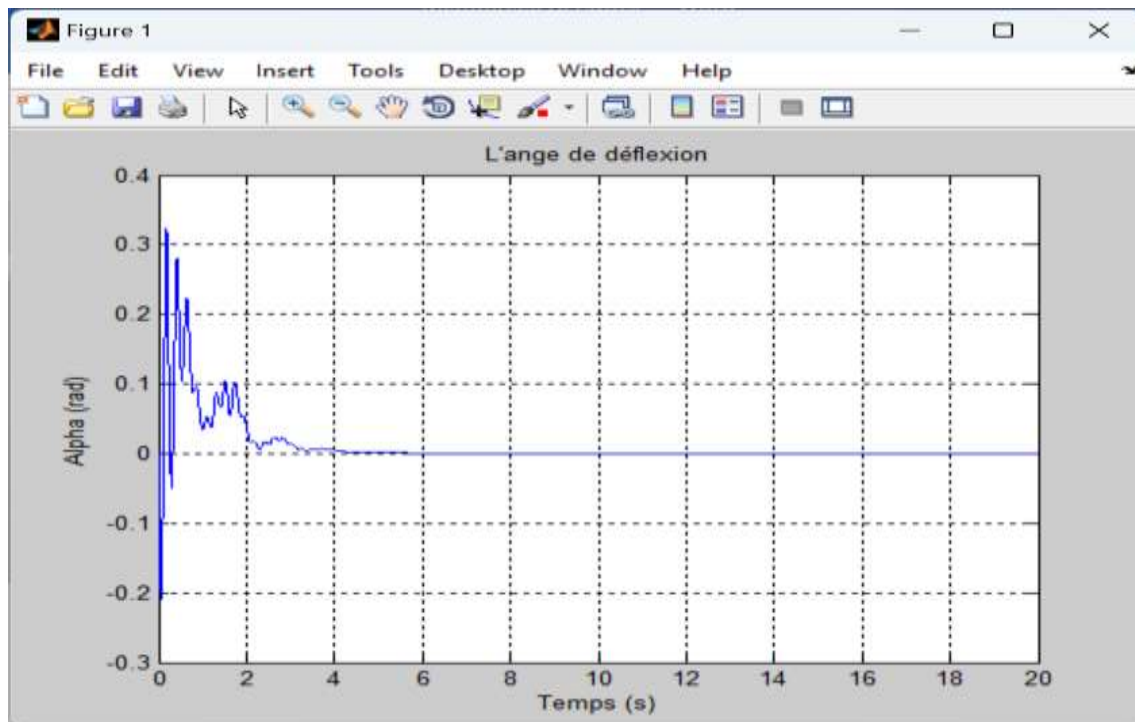


Figure IV.19 : Angle de déflexion

La figure montre que la méthode de commande par mode glissant-flou est efficace pour stabiliser l'angle de déflexion du robot manipulateur flexible. Bien que le système subisse des oscillations initiales importantes, il parvient à réduire ces oscillations et à atteindre une stabilité quasi parfaite en moins de **6 secondes**. Cela démontre la capacité du contrôleur à gérer les dynamiques complexes du robot et à maintenir une position stable.

- L'erreur et dérivé de l'erreur :

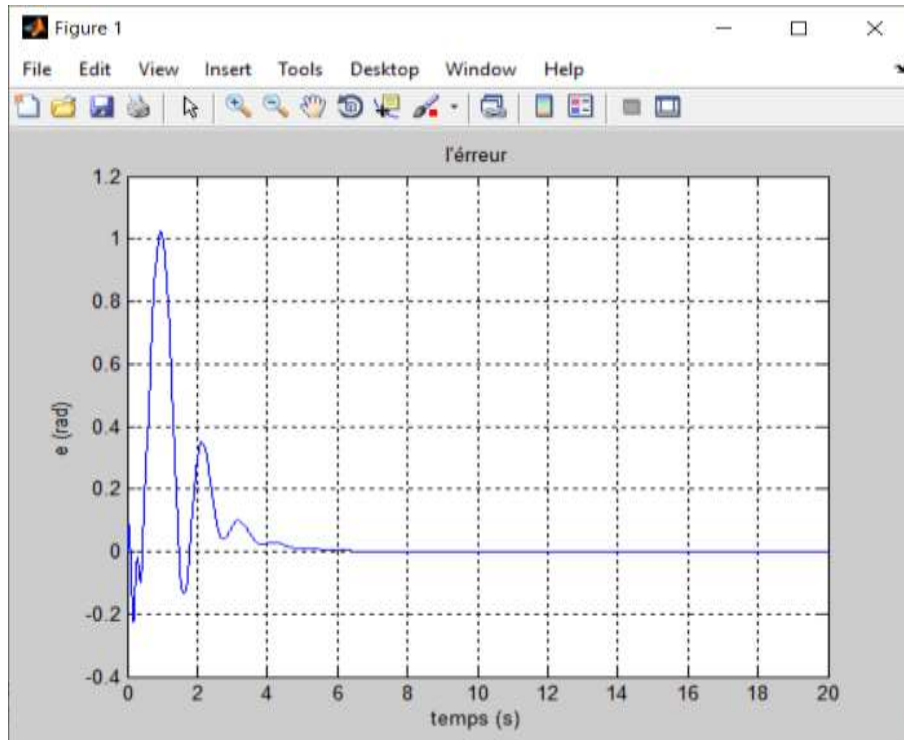


Figure IV.20 : Erreur de position angulaire

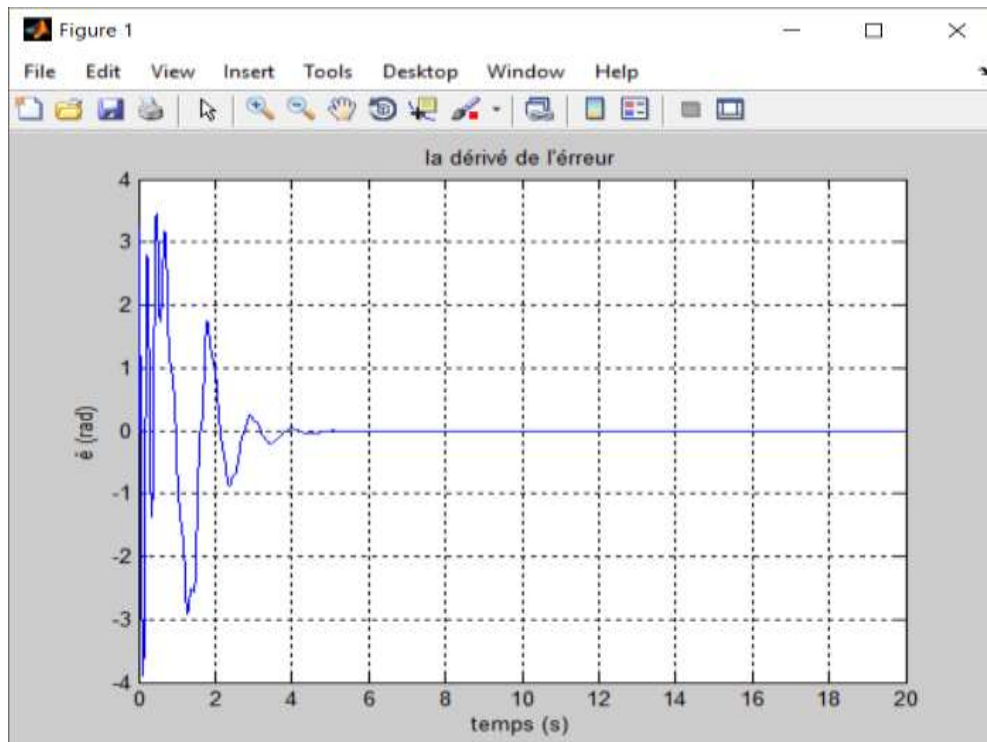


Figure IV.21 : Dérivé de l'erreur

Les figures montrent que la commande par mode glissant-flou est efficace pour minimiser l'erreur entre la trajectoire réelle et la trajectoire désirée d'un robot manipulateur flexible. Bien que les oscillations initiales soient importantes, elles diminuent rapidement, et le système atteint une stabilité presque parfaite en moins de **6 secondes**. La dérivée de l'erreur confirme cette stabilité en montrant des corrections de plus en plus petites après la période initiale d'oscillations. Ces résultats indiquent une bonne performance du contrôleur glissant-flou dans la gestion des dynamiques complexes du robot.

- **La commande U :**

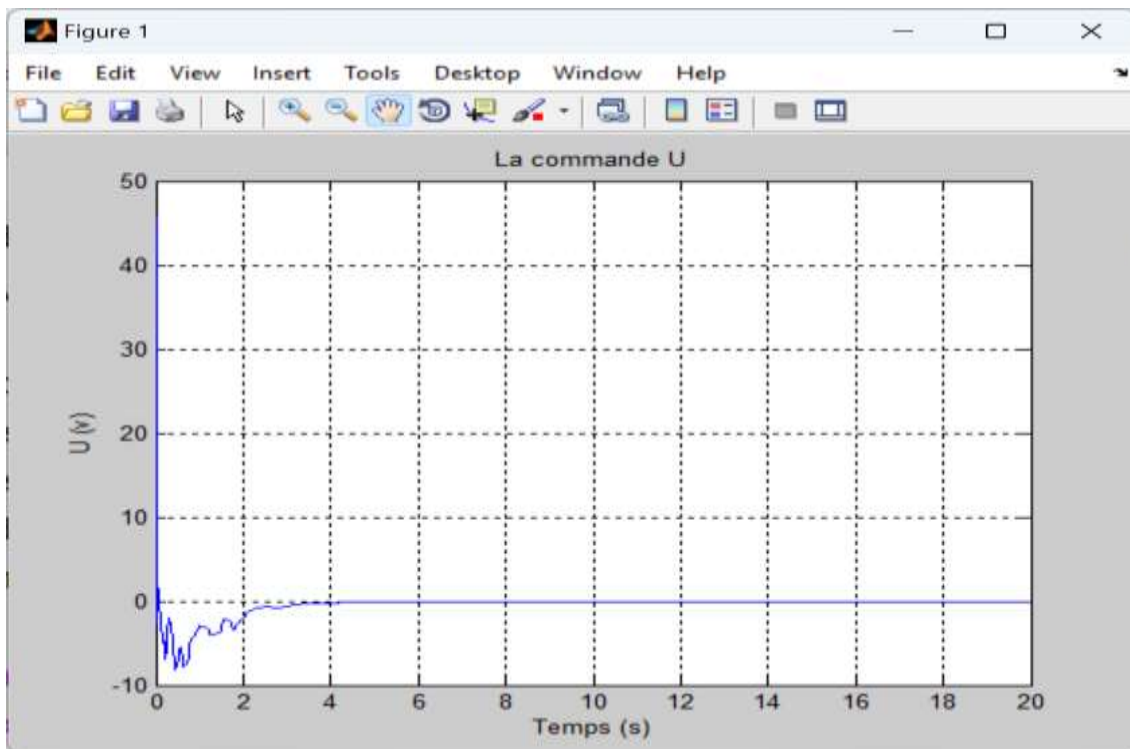


Figure IV.22 : Signal de commande

Dans cette figure, il est important de mentionner que le signal de commande ne présente aucun chattering et il est moins énergétique.

IV.6. Test de robustesse

IV.6.1. Introduction de perturbations et variation paramétrique

Nous avons introduit des variations paramétriques et une perturbation par un signal carré d'amplitude 3 ($A=3$) et d'une période 2s (6-8).

- La trajectoire :

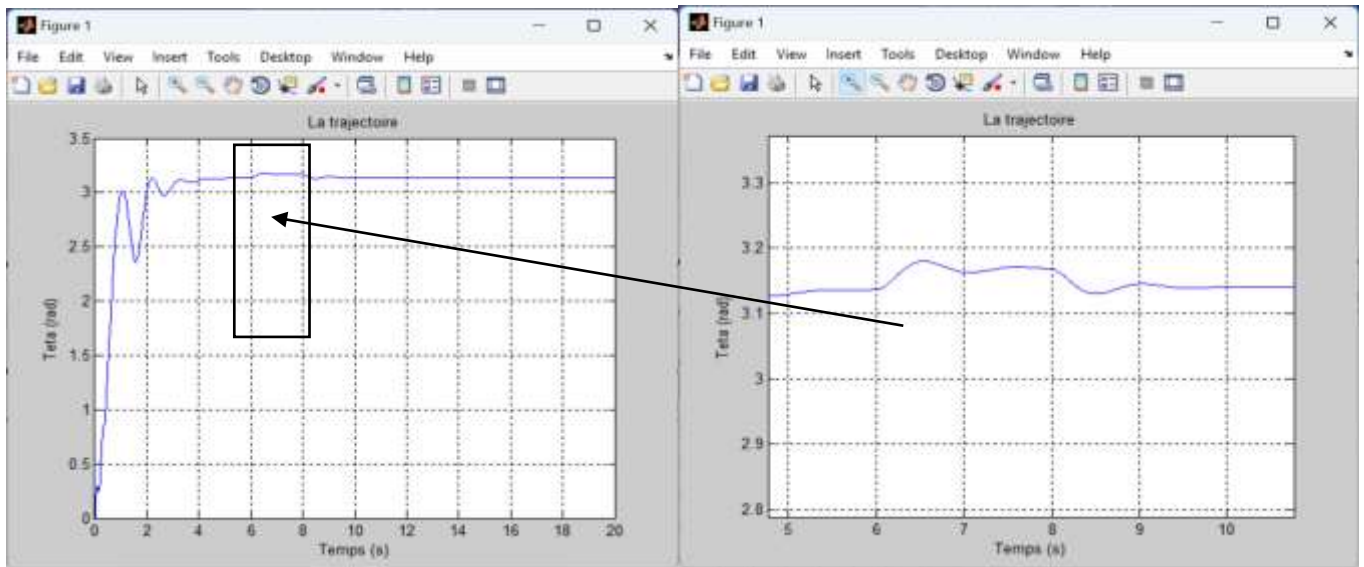


Figure IV.23 : Trajectoire avec la commande par glissant-flou et perturbation

Les graphiques montrent que le contrôleur par mode glissant-flou permet de maintenir la trajectoire du robot manipulateur flexible proche de la valeur désirée, même en présence de perturbations.

- L'angle de déflexion :

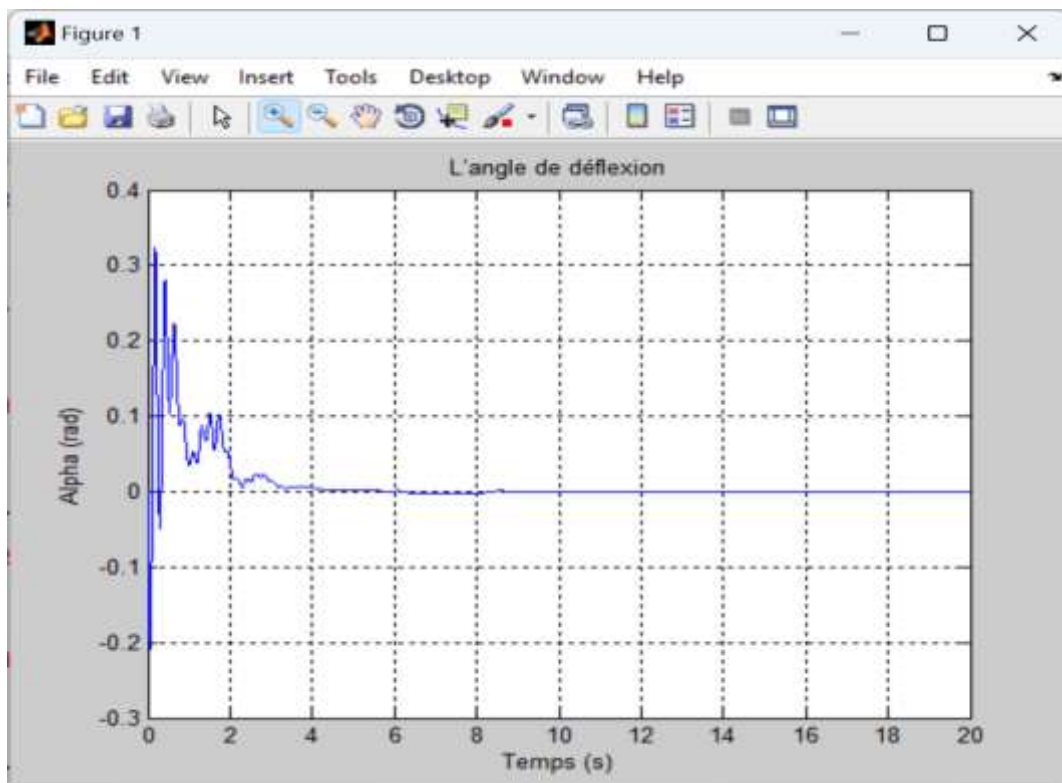


Figure IV.24 : Angle de déflexion

Même avec une perturbation introduite entre (6 et 8 secondes), le système maintient l'angle de déflexion très proche de **0 rad**, prouvant la robustesse et l'efficacité du contrôle par mode glissant-flou dans le rejet des perturbations.

- L'erreur et le dérivé de l'erreur :

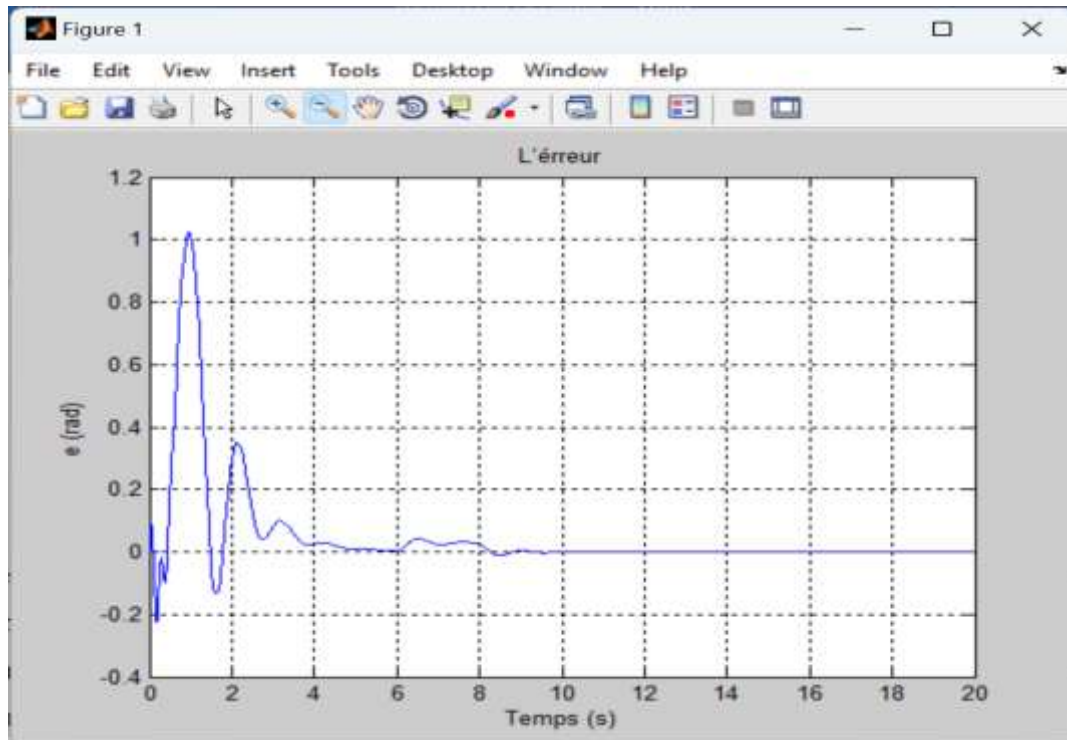


Figure IV.25 : Erreur de position angulaire

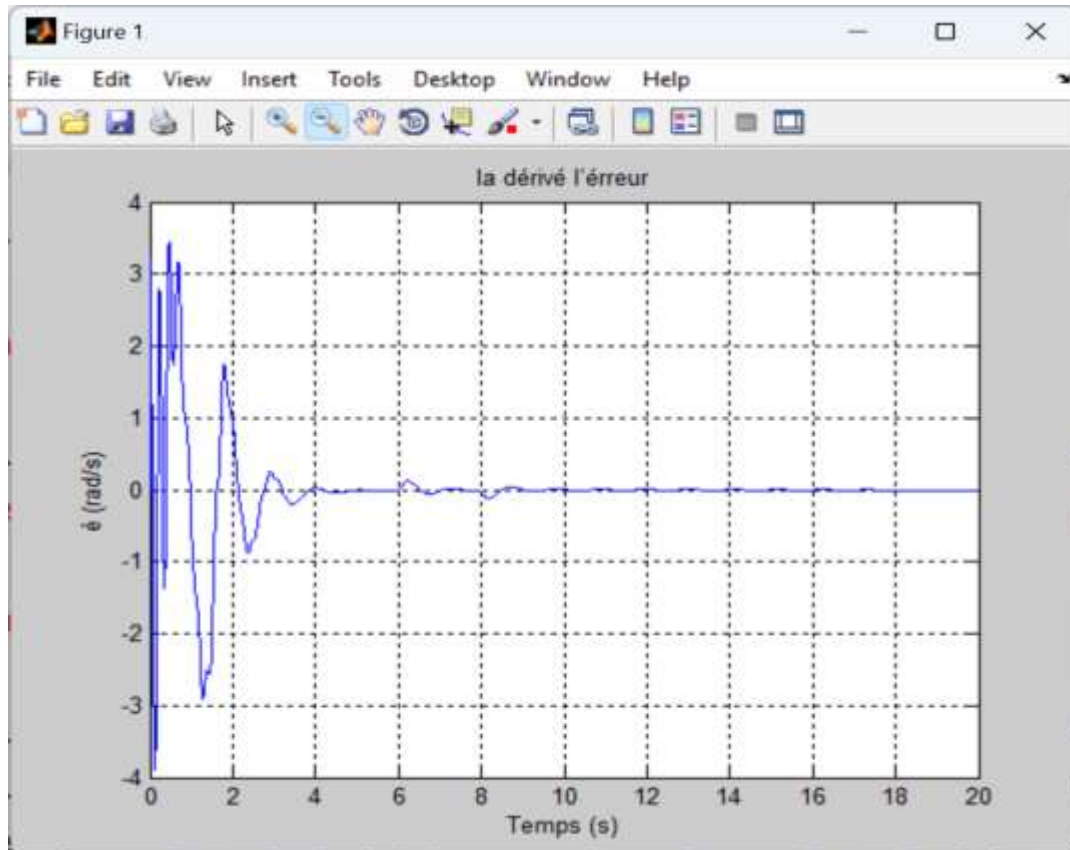
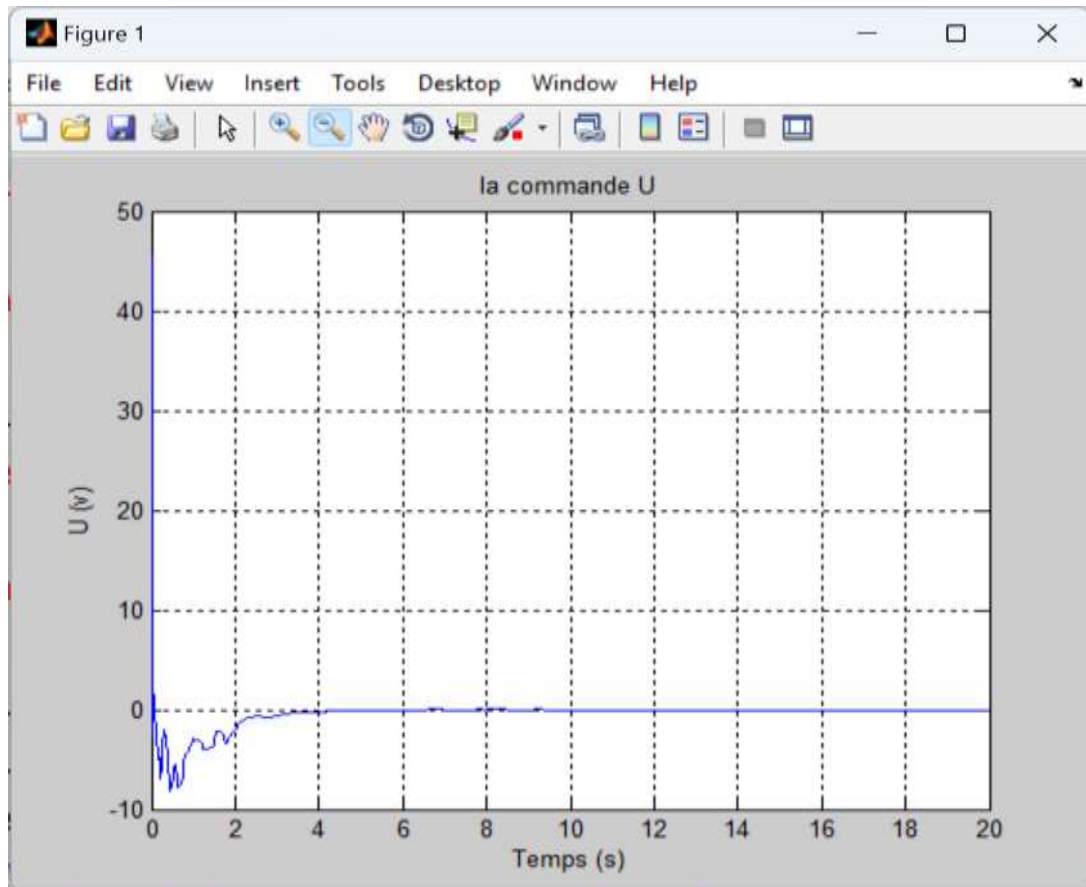


Figure IV.26 : Dérivé de l'erreur

L'erreur de position angulaire et l'erreur de vitesse convergent vers zéro, ce qui montre que la commande par mode glissant-flou maintient le système à la position et à la vitesse désirées.

La commande U :

*Figure IV.27* : Commande U

Les oscillations initiales dans la commande sont rapidement amorties, et le signal de commande reste proche de **0 V** pendant la majeure partie du temps, même en présence d'une perturbation externe entre **6 et 8 secondes**. Cela démontre la capacité du contrôleur glissant-flou à gérer les perturbations de manière robuste et efficace, minimisant ainsi les fluctuations dans le signal de commande et maintenant la stabilité du système.

IV.7. Conclusion

Afin d'obtenir le contrôle de la position avec une grande précision et supprimer les vibrations, une stratégie de commande combinée basée sur le concept de la commande par mode glissant et la logique floue a été proposée dans ce chapitre. Un contrôleur flou a été utilisé pour remplacer la commande discontinue de la commande par mode glissant et estimer les incertitudes et les perturbations, en éliminant ainsi le phénomène de chattering, tout en gardant sa robustesse.

Le contrôle glissant-flou est une méthode de contrôle avancée qui offre des avantages significatifs pour la commande des robots manipulateurs flexibles. Sa capacité à stabiliser rapidement le système, à gérer efficacement les perturbations, à maintenir un signal de commande stable et à minimiser l'erreur ont fait d'elle un choix optimal pour des applications nécessitant une grande précision et une robustesse. Les résultats indiquent que l'utilisation de cette approche peut améliorer la performance globale et la fiabilité des robots manipulateurs flexibles dans des environnements dynamiques et incertains.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La commande des robots manipulateurs à articulations flexibles constitue un défi complexe en raison de la nature non linéaire et hautement complexe de ces systèmes, qui sont également sujets aux vibrations. Ce mémoire a abordé ces défis en se concentrant sur le développement et l'optimisation de lois de commande non linéaire, essentielles pour améliorer les performances des manipulateurs flexibles dans divers secteurs industriels.

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire, au problème de la commande de mouvement d'un robot manipulateur à articulation flexible. Ce système est non-linéaire et multi-variables avec de forts couplages internes.

Afin de satisfaire à la fois les spécifications de performances en suivi de trajectoire, d'amortissement de vibrations et de robustesse en stabilité, nous avons proposé une stratégie de commande robuste basée sur une combinaison de deux approches non linéaires, à savoir, la logique floue pour son raisonnement humain et le mode glissant pour sa robustesse.

Dans un premier temps, une commande par mode glissant a été développée. Cette approche a permis une amélioration significative des performances du système. Toutefois, elle a introduit le phénomène de chattering, caractérisé par des fluctuations indésirables dans le signal de commande.

Pour résoudre ce problème, la commande discontinue par mode glissant a été remplacée par un système flou (fuzzy system). Les simulations ont révélé que cette nouvelle approche non seulement élimine le chattering, mais améliore aussi nettement les performances globales du système. Les tests de simulation ont confirmé l'efficacité et la robustesse de la commande par mode glissant-flou proposée.

En conclusion, le travail réalisé dans ce mémoire a montré que l'intégration de la logique floue dans le contrôle par mode glissant est une solution efficace pour surmonter les défis liés à la non-linéarité et aux vibrations des robots manipulateurs à articulations flexibles. Les résultats obtenus montrent que la commande glissant-flou offre une amélioration significative en termes de stabilité et de performance, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'application industrielle de ces systèmes.

Bibliographie

Chapitre I - Robots manipulateurs à articulations flexibles – Modélisation

- ❖ [1] Quanser Student Handout, Rotary Flexible Joint Module. <http://www.quanser.com>.

Chapitre II - Théorie de la commande par mode glissant

- ❖ [2] V.D. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", IEEE Transactions on industrial electronics, volume 40, numéro 1, février 1993, pages 23-36.
- ❖ [3] V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes", IEEE Transactions on Automatic Control, volume 22, numéro 2, avril 1977, pages 212-222.
- ❖ [4] V.I. Utkin, J. Guldner, J. Shi, "Sliding mode control in electromechanical systems", Taylor & Francis, 2nd édition, 2009.
- ❖ [5] L. Fridman et A. Levant, "Higher order sliding modes", dans Control and Observation of Neutral Systems, Springer, 2006, pages 53-101.
- ❖ [6] J.J.E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, 1991.
- ❖ [7] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control", International Journal of Control, vol. 58, no. 6, pp. 1247-1263, 1993.
- ❖ [8] A. Levant, "Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control", International Journal of Control, vol. 76, no. 9, pp. 924-941, 2003.
- ❖ [9] V.I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, 1993.

Chapitre III - Théorie de la commande par logique floue

- ❖ [10] Lotfi A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and Control, Volume 8, Issue 3, June 1965, Pages 338-353.
- ❖ [11] E. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proceedings of the IEE, volume 121, numéro 12, décembre 1974, pages 1585-1588.
- ❖ [12] M. Sugeno, "Fuzzy measures and fuzzy integrals—a survey", Fuzzy Automata and Decision Processes, 1977, pages 89-102.
- ❖ [13] M. Sugeno, T. Yasukawa, "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, volume 1, numéro 1, février 1993, pages 7-31.
- ❖ [14] J. J. Buckley et E. Eslami, "An introduction to fuzzy logic and fuzzy sets", Physica Verlag, 2002.
- ❖ [15] J.J.E. Slotine, W. Li, Applied nonlinear control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

- ❖ [16] MATLAB Simulink User's Guide, The MathWorks Inc, Natick, MA, 2022.
- ❖ [17] R. Palm, D. Driankov, H. Hellendoorn, Model-based fuzzy control, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- ❖ [18] K.S. Narendra, K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, 1990.

Chapitre IV - Commande par mode glissant-flou du robot flexible

- ❖ [19] D. Wang, D. Liu, X. Wei, "Adaptive fuzzy sliding mode control for robotic manipulators including actuator dynamics," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), vol. 36, no. 1, pp. 1-12, 2006.
- ❖ [20] C.C. Hang, K.J. Tsai, C.H. Hsu, "Fuzzy sliding-mode control for robotic manipulators," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 5, no. 2, pp. 246-257, 1997.
- ❖ [21] MATLAB Simulink User's Guide, The MathWorks Inc, Natick, MA, 2022.