

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Par :

Benabbou Yacine & Senoussaoui Lilya

Sujet :

Commande robuste par modes glissants flous
d'un bras manipulateur hyper dynamique

Soutenu publiquement, le ____/06/2026, devant le jury composé de :

Mr. BENYAHIA BOUMEDIENE	Professeur	Université de Tlemcen	Président.
Mr. BENSALAH CHOUKRI	MCA	Université de Tlemcen	Examineur.
Mme. BENMANSOUR SOUHILA	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante.

Année universitaire 2025/2026

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
1 Généralités sur la robotique	4
1.1 Introduction	4
1.2 Concepts fondamentaux en robotique	4
1.2.1 Bref historique de la robotique	5
1.2.2 La robotique dans la société actuelle	6
1.2.3 Classification des robots	6
1.2.3.1 Robots humanoïdes	6
1.2.3.2 Robots manipulateurs	7
1.3 Robot manipulateur hyper dynamique	10
1.3.1 Manipulation hyper dynamique	10
1.3.2 Préliminaires	10
1.3.3 Transition des robots conventionnels vers les robots hyper dynamiques .	11
1.4 Robots golfeurs	11
1.5 Conclusion	15
2 Présentation et modélisation du robot	16
2.1 Introduction	16
2.2 Analyse du mouvement de jeu golf	16
2.3 Prototypage du robot golfeur	18
2.3.1 Choix du nombre de degrés de liberté	18
2.3.2 Conception de base du robot	19
2.3.2.1 Éléments constitutifs du robot	19
2.3.2.2 Structure des stoppeurs	20
2.3.2.3 Intérêt des moteurs à entraînement direct	21
2.4 Principe de fonctionnement du robot	21
2.5 Modélisation du robot golfeur	23
2.5.1 Hypothèses du modèle	23
2.5.2 Modèle dynamique	24
2.5.2.1 Modélisation du couple passif des stoppeurs	28
2.6 Conclusion	28

3	Théorie des commandes appliquées au robot Golfeur	30
3.1	Introduction	30
3.2	Aperçu des stratégies de commande appliquées au robot golfeur	30
3.3	Théorie de la commande par mode glissant	31
3.3.1	Évolution de la commande SMC	31
3.3.2	Concept et principe de la commande SMC	32
3.3.3	Conception de la commande par mode de glissement	33
3.3.3.1	Sélection de la surface de glissement	33
3.3.3.2	Condition d'existence de convergence	34
3.3.3.3	Détermination de la commande	35
3.3.4	Problème du phénomène de Chattering	37
3.3.4.1	Définition du phénomène	37
3.3.4.2	Suppression du phénomène	38
3.4	Théorie de la logique floue	39
3.4.1	Évolution de la FLC	39
3.4.2	Fondements de la théorie des ensembles flous	39
3.4.3	Concepts de base de la logique floue	40
3.4.3.1	Sous-ensembles flous	40
3.4.3.2	Variables linguistiques	42
3.4.3.3	Opérations sur les ensembles flous	43
3.4.3.4	Fonction d'appartenance	44
3.4.3.5	Propositions et règles floues	45
3.4.4	Architecture générale d'un contrôleur flou	47
3.4.4.1	Interface de fuzzification	47
3.4.4.2	Base de règles du contrôleur flou	47
3.4.4.3	Mécanisme d'inférence	48
3.4.4.4	Interface de défuzzification	51
3.5	Conclusion	51
4	Application des commandes robustes au robot golfeur	52
4.1	Introduction	52
4.2	Commande par mode glissant appliquée au robot	52
4.2.1	Conception de loi de commande SMC	52
4.3	Commande mode glissant flou (FSMC) appliquée au robot	55
4.3.1	Conception de l'interférence floue (FLC)	55
4.4	Simulations et interprétation des résultats	59
4.4.1	Perturbations et incertitudes	60
4.4.1.1	Bruits de mesure sur les positions et les vitesses articulaires	60
4.4.1.2	Perturbation extérieure : choc d'impact	61
4.4.1.3	Incertitudes paramétriques	62
4.4.2	Simulation du contrôleur SMC et analyse des performances	62
4.4.2.1	Sensibilité au bruit de mesure	62

4.4.2.2	Sensibilité au choc d'impact	64
4.4.2.3	Test de robustesse aux variations paramétriques	66
4.4.3	Simulation du contrôleur FSMC et analyse des performances	68
4.4.3.1	Sensibilité au bruit de mesure	68
4.4.3.2	Sensibilité au choc d'impact	70
4.4.3.3	Test de robustesse aux variations paramétriques	72
4.5	Conclusion	74
Conclusion		76
Bibliographie		78
Résumé		83

Table des figures

1.1	Robot humanoïde. (a) Robot Optimus de Tesla, (b) Robot Atlas de Boston Dynamics.	7
1.2	Structure mécanique poly-articulée d'un bras manipulateur.	8
1.3	Bras manipulateur industriel. (a) KUKA KR QUANTEC, (b) ABB IRB 6700, (c) Universal Robots UR10e.	9
1.4	Bras manipulateur domestique "Stretch RE1".	9
1.5	Bras manipulateur éducatif "DOBOT Magician".	9
1.6	Robot golfeur « Iron Byron ».	12
1.7	Robot golfeur « ADAMS ».	13
1.8	Robot golfeur flexible 1.	13
1.9	Robot golfeur « Achiever Analyzer ».	14
1.10	Robot golfeur flexible 2.	14
1.11	Robot golfeur rigide.	15
2.1	Différentes phases de mouvement de tir de golf.	17
2.2	Club du jeu de golf.	17
2.3	Structure articulaire et segments du robot golfeur.	18
2.4	Prototype du robot golfeur.	19
2.5	Structure des stoppeurs.	20
2.6	Structure équivalente d'un stoppeur mécanique.	21
2.7	Mécanisme du robot golfeur.(a) : Période de pré-impact. (b) : Période d'impact. (c) : Période de post-impact	22
2.8	Swing du robot golfeur.	23
2.9	Modèle du robot golfeur.	24
3.1	Principe de fonctionnement de la commande SMC.	33
3.2	Surface de glissement dans le plan de phase.	34
3.3	Représentation de la commande de commutation.	36
3.4	Schéma bloc de la commande par mode glissant.	37
3.5	Phénomène de chattering.	38
3.6	Fonctions de commutation : (a) Saturation, (b) Smooth, (c) Arc tangente.	39
3.7	Ensemble booléen et ensemble flou.	40
3.8	Caractéristiques essentielles d'un sous-ensemble flou.	41
3.9	Fonctions d'appartenance associées à la variable linguistique « vitesse ».	43
3.10	Spécificité et précision à travers les sous-ensembles flous.	43

3.11	Représentation graphique de l'intersection et de l'union de deux ensembles flous.	44
3.12	Principales formes de fonctions d'appartenance utilisées dans les ensembles flous.	45
3.13	Structure générale d'un contrôleur flou.	47
3.14	Méthode d'inférence Max-Min.	49
3.15	Méthode d'inférence Max-Produit.	50
3.16	Méthode d'inférence Somme-Produit.	50
3.17	Défuzzification par la méthode du centre de gravité.	51
4.1	Schéma fonctionnel de la commande SMC appliquée au robot golfeur.	55
4.2	Fonctions d'appartenance des entrées S_1 et S_2 .	56
4.3	Fonctions d'appartenance de la sortie τ_f .	57
4.4	Schéma fonctionnel de la commande FSMC appliquée au robot golfeur.	59
4.5	Contrôle du robot golfeur en présence du bruit de mesure.	61
4.6	Contrôle du robot golfeur en présence du choc d'impact.	61
4.7	Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec bruit de mesure).	62
4.8	Commandes SMC avec bruit de mesure.	63
4.9	Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec bruit de mesure).	63
4.10	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec bruit de mesure).	63
4.11	Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec choc d'impact).	64
4.12	Commandes SMC avec choc d'impact.	65
4.13	Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec choc d'impact).	65
4.14	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec choc d'impact).	65
4.15	Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec test de robustesse).	66
4.16	Commandes SMC avec test de robustesse.	67
4.17	Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec test de robustesse).	67
4.18	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec test de robustesse).	67
4.19	Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec bruit de mesure).	68
4.20	Commandes FSMC avec bruit de mesure.	69
4.21	Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec bruit de mesure).	69
4.22	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec bruit de mesure).	69
4.23	Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec choc d'impact).	70
4.24	Commandes FSMC avec choc d'impact.	71
4.25	Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec choc d'impact).	71
4.26	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec choc d'impact).	72
4.27	Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec test de robustesse).	73
4.28	Commandes FSMC avec test de robustesse.	73
4.29	Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec test de robustesse).	73
4.30	Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec test de robustesse).	74

Liste des tableaux

3.1	La conjonction (et) selon différentes approches logiques	45
3.2	La disjonction (ou) selon différentes approches logiques	46
3.3	L'implication selon différentes approches logiques	46
3.4	Matrice d'inférence des règles floues.	48
4.1	Fonctions d'appartenance de sortie	57
4.2	Base de règles du contrôleur flou	57
4.3	Paramètres physiques du robot golfeur	60
4.4	Paramètres des actionneurs	60

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, Madame Benmansour Souhila, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement et ses orientations nous ont beaucoup aidées à avancer et à surmonter les difficultés rencontrées durant ce travail.

Nous remercions également les membres du jury , Mr BENYAHIA Boumediene et Mr BENSALAH Choukri , pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre mémoire.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire et qui nous ont transmis leurs connaissances durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles et à nos proches pour leur soutien moral, leur patience, leurs encouragements permanents et leur confiance en nous durant tout notre parcours.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La robotique industrielle s'est fortement développée au siècle dernier afin de répondre aux exigences de répétition, de précision et de cadence de production, donnant naissance notamment aux bras manipulateurs. Grâce aux progrès réalisés en électronique, informatique, automatique et dans d'autres disciplines, les robots ont évolué vers des systèmes de plus en plus autonomes et intelligents, capables d'exécuter des tâches complexes dans des domaines variés tels que l'exploration, le service, l'intervention ou encore les applications ludiques.

Un système robotique est défini comme un système artificiel doté de capteurs et d'actionneurs, conçu pour interagir avec son environnement. Il existe plusieurs types de robots, notamment les bras manipulateurs, les mains articulées, les véhicules terrestres ou aériens, ainsi que les robots humanoïdes. Face à la complexification des manipulateurs, une nouvelle génération de robots hyper dynamiques a émergé, visant des performances plus rapides et plus efficaces. Inspirés du mouvement humain et de son anatomie, ces systèmes constituent un enjeu majeur de recherche, notamment dans le domaine de la conception de robots anthropomorphes.

La recherche de stratégies de commande robuste pour les robots manipulateurs hyper dynamiques constitue aujourd'hui un axe majeur de la robotique moderne. Cet intérêt s'explique par la volonté de développer des robots anthropomorphes destinés à des applications variées, nécessitant la modélisation du comportement humain sous forme d'équations du mouvement. Par ailleurs, ces systèmes ultra-rapides posent des défis importants en automatique non linéaire, ce qui rend la conception de lois de commande robustes particulièrement pertinente, tant sur le plan théorique que pratique.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser le mouvement du bras humain afin de proposer un modèle adapté à ses fonctionnalités. Dans ce cadre, une application particulière est étudiée, à savoir la reproduction du geste d'un golfeur professionnel, en mettant en évidence les phénomènes impliqués dans la réalisation du mouvement. Cette étude s'inscrit dans le contexte des mouvements hyper dynamiques. Dans cette optique, le premier objectif est de développer un modèle de robot inspiré du bras humain, basé sur un transfert d'énergie entre l'épaule et le poignet appelé *couple dynamique d'anticipation*, ainsi que sur l'utilisation de stoppeurs mécaniques permettant de limiter le mouvement du poignet et de refléter son mouvement avec plus de réalisme possible. Le deuxième objectif consiste à appliquer au robot golfeur des techniques de commande non linéaires et robustes afin de compenser les perturbations et les incertitudes internes et externes du système, en particulier la commande par mode glissant et son amélioration par la logique floue, dans un cadre d'analyse comparative.

Enfin, des résultats concernant la stabilité, les performances et la robustesse des lois de commande seront présentés.

Le plan de ce mémoire s'articule comme suit :

- **Le premier chapitre** présente les notions fondamentales nécessaires à la compréhension du mémoire. Il est structuré en deux parties : une première partie consacrée aux généralités sur la robotique, et une seconde présentant un aperçu de l'état de l'art, avec un accent particulier sur les travaux liés aux robots hyper dynamiques, notamment les robots golfeurs.
- **Le deuxième chapitre** présente la conception et le mécanisme du robot étudié. Il développe ensuite son modèle dynamique basé sur le formalisme d'Euler-Lagrange. Enfin, des contraintes dynamiques ainsi que certaines améliorations sont introduites afin de répondre aux exigences du mouvement hyper dynamique.
- **Le troisième chapitre** présente les fondements théoriques des stratégies de commande robuste par mode glissant ainsi que de la commande robuste par mode glissant basée sur la logique floue. Il expose également la théorie des systèmes flous, puis leur association avec la commande par mode glissant afin d'en améliorer les performances.
- **Le quatrième chapitre** est consacré à l'application des commandes étudiées dans le chapitre précédent au robot golfeur. Il détaille la conception des lois de commande proposées ainsi que les résultats de simulation obtenus et leur analyse.
- **Enfin**, ce travail est clôturé par une conclusion générale présentant une synthèse des principaux résultats obtenus et proposant quelques perspectives de travaux futurs.

Chapitre 1

Généralités sur la robotique

1.1 Introduction

Le mouvement humain constitue un enjeu majeur dans plusieurs domaines tels que la médecine, la biomécanique, les neurosciences et l'automatique[1],[2]. Son étude reste complexe en raison des interactions entre le système musculo-squelettique, le système neuro-musculaire et les mécanismes de contrôle cérébral.

Les modèles proposés dans la littérature reposent sur des simplifications du système humain réel. Le corps humain est généralement représenté comme un système multicorps rigides articulés par des liaisons mécaniques, permettant principalement des mouvements de rotation, complété par des approches de simulation et de reproduction des trajectoires articulaires [3],[4].

Dans ce manuscrit, nous nous intéressons à l'imitation du mouvement ultra-rapide du bras humain, notamment à travers la reproduction du geste sportif du tir de golf d'un joueur professionnel, considéré comme un mouvement hyper dynamique [5].

Ce travail étudie le lien entre le mouvement humain et le contrôle d'un système anthropomorphe tel qu'un robot golfeur. Il nécessite une modélisation précise du bras humain ainsi que l'intégration de données anthropométriques afin de définir le mécanisme et le fonctionnement du manipulateur correspondant [2],[6].

La recherche de stratégies de commande robustes pour ce type de robot constitue un axe important de la robotique moderne. Ainsi, ce chapitre présente des généralités sur les robots, et plus particulièrement sur les robots manipulateurs hyper dynamiques, notamment les robots golfeurs.

1.2 Concepts fondamentaux en robotique

La robotique est une discipline pluridisciplinaire qui combine principalement l'informatique, l'automatique, l'électrotechnique et la mécanique. Cette complémentarité entre domaines constitue une base essentielle pour la conception de systèmes robotiques de plus en plus performants, autonomes et intelligents [7],[8].

D'un point de vue historique, les premiers automates mécaniques apparaissent dès l'Antiquité avec pour objectif d'imiter le mouvement humain ou d'assister l'homme dans des tâches

pénibles. Avec l'essor de l'informatique au XX^e siècle, puis le développement de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique, la robotique a évolué vers des systèmes capables d'adapter leur comportement à des environnements dynamiques et incertains [9],[10].

Aujourd'hui, la robotique est généralement définie comme la science du lien intelligent entre la perception et l'action. La perception repose sur l'acquisition et le traitement des données issues de capteurs (caméras, lidars, capteurs de force, microphones, etc.), tandis que l'action correspond aux réponses du robot sous forme de mouvements ou d'interactions physiques avec l'environnement [11].

Un robot est une machine capable d'agir et de s'adapter à son environnement, même complexe, en remplaçant ou en assistant l'être humain. Il est constitué d'un système mécanique comportant plusieurs degrés de liberté motorisés permettant des mouvements de rotation et de translation. Il intègre également des capteurs assurant la perception de son état interne et de son environnement.

1.2.1 Bref historique de la robotique

La robotique est une discipline en constante évolution dont le développement résulte de plusieurs avancées scientifiques et technologiques successives. Son histoire reflète la volonté humaine de concevoir des machines capables d'imiter, d'assister et parfois de remplacer certaines actions humaines. Elle s'est construite progressivement à travers différentes périodes marquées par des innovations majeures en mécanique, en électronique et en informatique.

- **Antiquité (avant J.-C. – IV^e siècle)**

Les premières traces de la robotique remontent à l'Antiquité avec l'apparition des automates mécaniques, conçus principalement pour imiter les mouvements humains ou animaux. Ces dispositifs, souvent à vocation ludique ou symbolique, reposaient sur des principes mécaniques simples et constituent les premières formes d'objets autonomes [12].

- **Renaissance (XV^e – XVII^e siècle)**

Durant cette période, les automates deviennent plus complexes grâce aux progrès de l'horlogerie et de la mécanique de précision. Des ingénieurs et inventeurs développent des machines capables d'exécuter des mouvements programmés, marquant une étape importante vers la robotique moderne [13].

- **Révolution industrielle (XVIII^e – XIX^e siècle)**

L'essor des machines industrielles et de la mécanisation transforme profondément la production. Les systèmes automatisés commencent à remplacer certaines tâches humaines répétitives, posant les bases de l'automatisation industrielle [14].

- **Années 1960**

L'apparition des premiers robots industriels marque un tournant majeur. Le robot **Unimate**, installé dans une usine automobile, est considéré comme le premier robot industriel programmable utilisé en production réelle, notamment pour des tâches de manutention et de soudage [15],[16].

- **Années 1980 – 2000**

La robotique connaît une évolution importante avec l'intégration des microprocesseurs, des capteurs et des systèmes de commande avancés. Les robots deviennent plus précis, plus flexibles et capables d'exécuter des tâches complexes dans des environnements industriels structurés [13], [17].

- **Années 2000 à aujourd'hui**

La robotique moderne se développe rapidement grâce à l'intelligence artificielle, la vision par ordinateur et les systèmes cyber-physiques. On assiste à l'émergence de la robotique collaborative, des robots mobiles autonomes et des robots humanoïdes. Ces systèmes sont aujourd'hui intégrés dans de nombreux secteurs tels que l'industrie, la santé et les services, dans le cadre de la transformation vers l'Industrie 4.0 [17], [18].

1.2.2 La robotique dans la société actuelle

La robotique connaît aujourd'hui une évolution massive dans de nombreux secteurs industriels et sociétaux, portée par les progrès de l'intelligence artificielle, de la mécatronique et des systèmes autonomes [12], [13]. Dans certains pays industrialisés comme le Japon, le vieillissement de la population favorise l'intégration de solutions robotiques afin de compenser le manque de main-d'œuvre et d'assister les personnes âgées [6]. Les robots sont largement utilisés dans l'industrie pour des tâches répétitives, pénibles ou dangereuses, avec une grande précision et une meilleure productivité que l'être humain. Ils sont présents dans les chaînes de production automobile et manufacturière pour des opérations telles que l'assemblage, le soudage et la peinture [3], [14]. Leur champ d'application s'étend également au domaine médical, spatial, logistique ainsi qu'aux robots de service et de loisirs. Cette diversification témoigne de leur importance croissante dans l'économie mondiale et dans la transformation numérique des sociétés modernes [1],[5].

1.2.3 Classification des robots

Il existe différents types de robots, dont nous présentons ci-après quelques exemples.

1.2.3.1 Robots humanoïdes

Les robots humanoïdes sont des systèmes mécatroniques inspirés de la morphologie et des capacités humaines, conçus pour reproduire certaines fonctions motrices et perceptives du corps humain. Ils disposent d'une structure articulée proche de celle de l'homme et utilisent des capteurs avancés pour interagir de manière autonome avec leur environnement. Les progrès récents en intelligence artificielle, en actionneurs électriques et en vision par ordinateur ont permis une évolution significative de leurs performances. Par exemple, le robot Optimus de Tesla, illustré par Figure (1.1, a), est développé pour effectuer des tâches répétitives en milieu industriel et logistique [17], tandis que le robot Atlas de Boston Dynamics, donné par Figure (1.1, b), est reconnu pour son agilité et sa capacité d'adaptation à des environnements complexes [18]. Aujourd'hui, ces robots sont principalement destinés à des applications industrielles, de recherche

et de service, avec pour objectif d'assister l'humain dans des environnements contraignants ou dangereux.



FIG. 1.1 : Robot humanoïde. (a) Robot Optimus de Tesla, (b) Robot Atlas de Boston Dynamics.

1.2.3.2 Robots manipulateurs

Les robots manipulateurs, bien que leurs premiers développements remontent à plusieurs décennies, se sont imposés à partir des années 1970 comme des éléments clés de l'automatisation industrielle. Ils constituent aujourd'hui une composante essentielle de la robotique moderne et des systèmes de production intelligents.

a- Définition Un robot manipulateur est une machine poly-articulée composée d'une base, d'un bras articulé et d'un effecteur terminal. Il est conçu pour exécuter des tâches précises dans un espace de travail donné, avec différents niveaux d'autonomie grâce à l'intégration de capteurs, d'actionneurs et de systèmes de commande avancés. Les manipulateurs actuels sont capables d'adaptation en temps réel et d'interaction sécurisée avec l'environnement, notamment dans les applications de robotique collaborative [8], [19].

b- Constitution principale Un robot manipulateur est un système électromécanique complexe conçu pour exécuter des tâches de manipulation avec précision et autonomie. Sa structure repose sur l'intégration de plusieurs sous-systèmes interdépendants qui assurent à la fois le mouvement, la perception de l'environnement et la prise de décision.

- **Structure mécanique**

Composée d'une chaîne poly-articulée incluant une base fixe, des bras rigides et un effecteur terminal (outil ou pince). Elle permet la réalisation des mouvements de rotation et de translation dans l'espace de travail (voir Figure (1.2)).

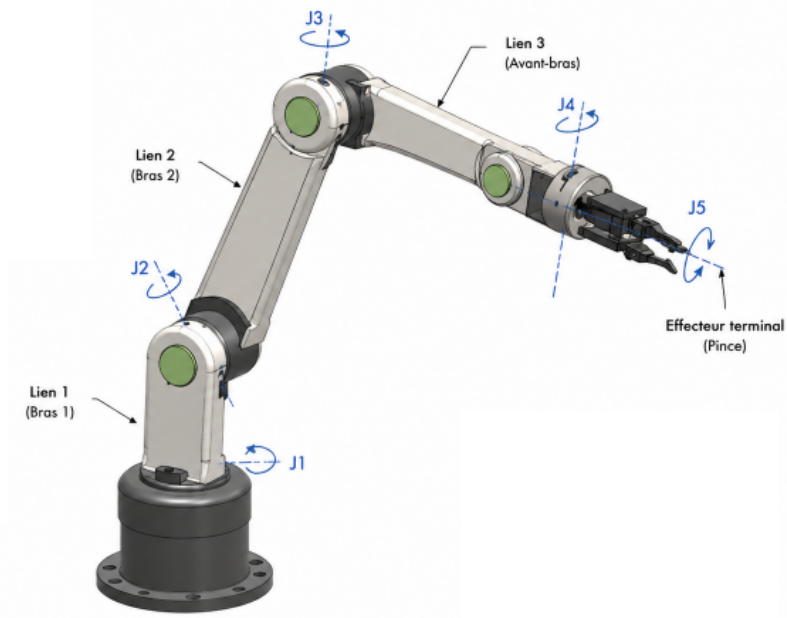


FIG. 1.2 : Structure mécanique poly-articulée d'un bras manipulateur.

- **Système d'actionnement** : Constitué de moteurs et de transmissions (électriques, hydrauliques ou pneumatiques). Il assure le mouvement des articulations avec précision, puissance et contrôle.
- **Système de perception** : Regroupe les capteurs (position, vitesse, effort, vision, etc.) permettant au robot de connaître son état interne ainsi que son environnement.
- **Système de commande** : Correspond à l'unité de traitement qui exploite les données des capteurs, calcule les lois de commande et pilote les actionneurs pour exécuter les tâches de manière autonome ou supervisée.

c- Domaines d'application

- **L'industrie**

Dans le secteur industriel, les robots manipulateurs sont largement utilisés pour des tâches répétitives, précises ou dangereuses. Par exemple, le **KUKA KR QUANTEC**, donné par Figure (1.3,a), est utilisé dans l'industrie automobile pour le soudage et l'assemblage de structures métalliques [14]. Le robot **ABB IRB 6700**, illustré par Figure (1.3,b), est employé pour la palettisation et la manutention lourde dans les chaînes de production modernes. De plus, le robot collaboratif **Universal Robots UR10e**, donné par Figure (1.3, c), est utilisé dans les PME (Petites et Moyennes Entreprises) pour des tâches flexibles telles que l'assemblage et le conditionnement.



FIG. 1.3 : Bras manipulateur industriel. (a) KUKA KR QUANTEC, (b) ABB IRB 6700, (c) Universal Robots UR10e.

- **Domestique**

Dans les environnements domestiques, les robots manipulateurs sont utilisés pour l'assistance aux personnes âgées ou à mobilité réduite. Par exemple, le robot Stretch RE1 de Hello Robot, illustré par Figure (1.4), est capable de manipuler des objets et d'assister les utilisateurs dans des tâches quotidiennes telles que le rangement ou la manipulation d'objets [5].



FIG. 1.4 : Bras manipulateur domestique “Stretch RE1”.

- **Éducatif et ludique**

Dans le domaine éducatif et ludique, des robots comme le **DOBOT Magician**, donné par Figure (1.5), sont utilisés pour l'apprentissage de la robotique et de la programmation. Ils permettent de réaliser des tâches simples telles que le dessin, la manipulation d'objets ou la simulation de processus industriels, facilitant ainsi l'initiation aux technologies robotiques [12].



FIG. 1.5 : Bras manipulateur éducatif “DOBOT Magician”.

- **Évolution vers les systèmes intelligents et connectés**

Avec l'évolution de l'intelligence artificielle et des systèmes cyber-physiques, les robots manipulateurs deviennent de plus en plus autonomes et intelligents. Ils s'intègrent désormais dans les environnements de type Industrie 4.0, où ils collaborent avec les humains et d'autres machines dans des systèmes de production connectés et optimisés [2], [11].

1.3 Robot manipulateur hyper dynamique

1.3.1 Manipulation hyper dynamique

Une manipulation hyper dynamique correspond à l'exécution de mouvements très rapides et hautement spécialisés, similaires à ceux réalisés par les athlètes. La reproduction de tels mouvements par une structure robotique intelligente constitue un domaine de recherche important en robotique, en raison de l'amélioration continue des performances dynamiques des manipulateurs [20].

1.3.2 Préliminaires

Nous présentons dans ce paragraphe quelques propriétés structurelles susceptibles d'être rencontrées dans les robots manipulateurs hyper dynamiques.

a- Structure ingénieuse

Le mouvement du bras humain repose sur une structure biomécanique appelée ingénieuse dans laquelle l'articulation la plus puissante, représentée par l'épaule, possède une capacité de génération d'énergie plus importante que les articulations distales telles que le coude et le poignet. La réalisation de gestes hyper dynamiques, comme le swing de golf, nécessite ainsi un transfert progressif d'énergie de l'épaule vers les autres articulations sous forme de couples dynamiques d'anticipation. Ce phénomène, appelé accélération par étapes, assure la participation conjointe de l'ensemble des articulations dans la génération du mouvement global.

b- Manipulateur anthropomorphe

Par définition, un bras manipulateur anthropomorphe est un robot capable de reproduire de manière fidèle la structure et le fonctionnement du bras humain de façon autonome. Ces systèmes disposent de capacités de commande et de perception avancées leur permettant d'exécuter des tâches complexes.

c- Couple dynamique d'anticipation

Le couple dynamique d'anticipation représente l'énergie mise en jeu par l'être humain lors de l'exécution de mouvements hyper dynamiques. Cette énergie est transférée progressivement de l'articulation la plus puissante vers les articulations distales. Ce principe a constitué une base

importante pour la conception de manipulateurs hyper dynamiques dotés d’une structure biomécanique ingénieuse [21].

d- Stoppeurs ou limitateurs de mouvements

La manipulation hyper dynamique repose sur l’utilisation de stoppeurs articulaires mécaniques de type masse-ressort-amortisseur afin de reproduire un comportement proche du bras humain. Le ressort augmente la plage de mouvement des articulations, tandis que l’amortisseur réduit les chocs à ce niveau. Dans [22], une nouvelle structure de stoppeurs composée d’une paire d’aimants associée à un absorbeur de choc a été proposée. Cet élément passif a permis d’améliorer les performances dynamiques du manipulateur ultra rapide, notamment celles du robot golfeur étudié dans ce travail.

1.3.3 Transition des robots conventionnels vers les robots hyper dynamiques

Les robots manipulateurs conventionnels sont principalement conçus selon des critères cinématiques, où chaque articulation est commandée indépendamment en fonction de sa vitesse et de son accélération [23]. La limitation des mouvements est généralement assurée par des barrières électroniques associées à des stoppeurs mécaniques afin d’éviter les collisions articulaires [24]. Bien que cette approche garantisse la sécurité et la précision des mouvements, elle augmente la complexité, la masse et l’inertie du système, ce qui réduit ses performances dynamiques globales. Toutes ces limitations et ces inconvénients ont conduit au développement d’une nouvelle catégorie de robots manipulateurs hyper dynamiques. Contrairement aux robots conventionnels, ces systèmes sont conçus pour reproduire des mouvements ultra rapides et coordonnés, inspirés du mouvement humain [21]. Leur architecture repose sur une structure ingénieuse (biomécanique intelligente) où les articulations fonctionnent de manière coopérative grâce à un transfert progressif d’énergie, de l’articulation la plus puissante vers les articulations moins puissantes, en utilisant des couples dynamiques d’anticipation [21], [22],[25]. De plus, ces robots exploitent les couples passifs générés par les stoppeurs mécaniques afin d’améliorer la rapidité et l’efficacité du mouvement. Par ailleurs, les manipulateurs hyper dynamiques sont généralement plus légers et mieux adaptés aux mouvements complexes à haute vitesse [26]. Inspirés des travaux sur les robots humanoïdes, ils permettent la reproduction de gestes sportifs et dynamiques tels que le swing de golf qui fait l’objet de notre travail. Toutefois, leur commande reste plus complexe en raison des fortes interactions dynamiques entre les articulations et des contraintes liées à la stabilité du système.

1.4 Robots golfeurs

Le tir de golf constitue une application de mouvement hyper dynamique. Les robots golfeurs ont été développés pour remplacer les golfeurs professionnels dans l’évaluation des performances des équipements et l’optimisation du swing afin de reproduire le mouvement humain. Les recherches se sont principalement concentrées sur la conception de la structure du robot, sa

modélisation, l'identification de ses paramètres, la planification de trajectoires optimales et le développement de lois de commande assurant sa stabilité en simulation et sur des prototypes réels. Nous proposons à présent un aperçu des principaux robots golfeurs développés dans des laboratoires spécialisés en robotique du sport, ainsi que des systèmes commerciaux destinés à l'amélioration des performances du tir de golf.

a- Robot golfeur « Iron Byron »

Le premier robot golfeur commercial a été développé en 1966 par la société True Temper Sports (TTS), comme illustré en Figure (1.6). Son mouvement est basé sur des séquences cinématiques obtenues à partir de l'analyse du swing du golfeur professionnel Byron Nelson, d'où son appellation « Iron Byron » [27]. Ce robot possède deux degrés de liberté (2 ddl), est actionné par un mécanisme pneumatique et permet d'atteindre une vitesse d'impact maximale de 60 m/s.



FIG. 1.6 : Robot golfeur « Iron Byron ».

b- Robot golfeur « ADAMS »

Ce robot a été développé à l'Université de Floride, au sein du département de génie mécanique et aérospatial [28]. Il s'agit d'un robot parallèle (5ddl) reproduisant la cinématique des deux bras du golfeur, et destiné à l'évaluation des performances des clubs de golf et des balles. Des données biomécaniques humaines ont été utilisées pour établir son modèle géométrique ainsi que le générateur de mouvement. Ce prototype a été conçu pour réaliser différents tests de tir de golf (voir figure 1.7).



FIG. 1.7 : Robot golfeur « ADAMS ».

c- Robot golfeur flexible 1

Ce robot, de petite taille, est dédiée à la pratique du golf et a été développé au sein d'un laboratoire japonais de l'Université des ingénieurs de Hokkaido (Figure 1.8). Il s'agit d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté (épaule et poignet), dont le club constitue un élément flexible. Les deux articulations sont entraînées par des moteurs AC de 100 W pour la première articulation et de 50 W pour la seconde. Ce système a été utilisé par plusieurs chercheurs [29] afin de valider des résultats de simulation du mouvement du swing, en tenant

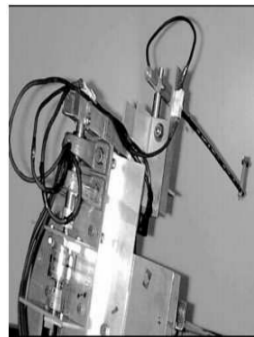


FIG. 1.8 : Robot golfeur flexible 1.

d- Robot golfeur « Achiever Analyzer »

Développé par la société américaine Golftek [30], ce robot (donné par Figure (1.9)) est un système dédié à l'analyse, la simulation et l'entraînement au golf. Il permet de programmer différents types de tirs en ajustant plusieurs paramètres (trajectoire, club, vitesse et angle d'impact), tout en enregistrant et analysant les données pour améliorer la précision par répétition. La détection de la balle est assurée par un capteur infrarouge au niveau de la tête du club. Ce robot est utilisé pour l'entraînement et l'évaluation des performances compte de la flexibilité du club ainsi que des perturbations extérieures.



FIG. 1.9 : Robot golfeur « Achiever Analyzer ».

e- Robot golfeur flexible 2

Ce robot est un bras manipulateur sous-actionné à deux degrés de liberté (figure 1.10), développé à l'École d'ingénierie de l'Université de technologie de Kochi au Japon [31]. Il se caractérise par un club flexible et un actionnement direct au niveau de l'articulation principale, destinée à reproduire le mouvement de l'épaule.

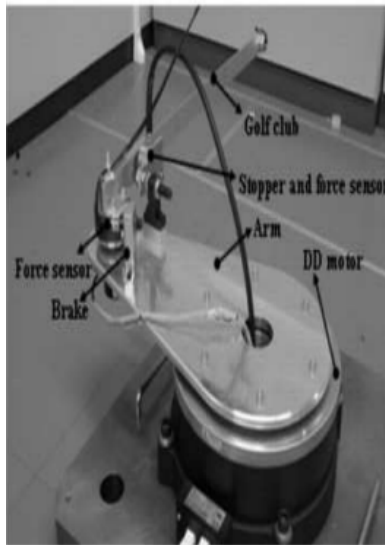


FIG. 1.10 : Robot golfeur flexible 2.

f- Robot golfeur rigide

Le robot présenté par Figure (1.11) a été développé par un groupe de chercheurs japonais à l'Université de l'Électro-communication de Tokyo, au sein du département de mécanique et systèmes intelligents [32]. Ce prototype a été conçu pour étudier, par simulation, les capacités de manipulation hyper dynamique appliquées au swing de golf, caractérisé par des mouvements rapides. Il est composé d'une base et de deux segments (bras et club), dont les articulations reproduisent respectivement les mouvements de l'épaule et du poignet. Inspiré de la structure ingénieuse du bras humain, ce robot intègre des stoppeurs mécaniques au niveau de la deuxième

articulation, tandis que son mouvement est assuré par des servomoteurs à entraînement direct. C'est le prototype de ce robot golfeur qui va être considéré dans notre application.



FIG. 1.11 : Robot golfeur rigide.

1.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une introduction générale à la robotique, avec un intérêt particulier pour les manipulateurs hyper dynamiques, notamment les robots golfeurs, caractérisés par des mouvements très rapides. Un aperçu des principaux robots golfeurs développés dans des laboratoires spécialisés en robotique du sport a également été présenté. Ces systèmes constituent le cœur de ce mémoire.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons d'abord la structure et le principe de fonctionnement du robot, avant de développer son modèle dynamique.

Chapitre 2

Présentation et modélisation du robot

2.1 Introduction

La modélisation en robotique est une étape essentielle permettant l'analyse, la simulation et la commande des systèmes articulés à travers des relations mathématiques décrivant leur interaction avec l'environnement. Lorsqu'elle s'appuie sur les lois physiques et le comportement réel du système, elle est appelée *modèle de connaissance*.

Les formalismes de Lagrange et de Newton–Euler figurent parmi les méthodes les plus utilisées pour établir le modèle dynamique des robots. Dans le cas du robot golfeur, la stabilité dépend du contrôle des efforts articulaires, fortement liés à sa dynamique, d'où la nécessité de définir les équations de mouvement tout en respectant les contraintes cinématiques du mécanisme.

Cependant, avant d'entamer cette étape cruciale, il est nécessaire de décrire avec précision la conception ainsi que la complexité du mécanisme de ce type de robot. Cela consiste à identifier les phénomènes intervenant dans la reproduction d'un mouvement hyper-dynamique permettant d'imiter le geste sportif d'un golfeur professionnel.

Le présent chapitre débute naturellement par une brève présentation du jeu de golf. Cela permet de décrire le mouvement du robot, appelé *swing*, en s'appuyant sur les données anatomiques du bras humain, afin d'en déduire par la suite un modèle mathématique représentatif.

2.2 Analyse du mouvement de jeu golf

Le mouvement du jeu de golf, appelé *swing*, est un geste dynamique complexe nécessitant une coordination précise afin d'assurer une frappe efficace de la balle. Il se caractérise par une succession de phases rapides permettant le transfert de l'énergie mécanique du joueur vers le club, puis vers la balle. Ces différentes étapes assurent la fluidité du mouvement ainsi que la génération de la vitesse et la précision du tir, comme illustré dans la Figure 2.1. Cette figure montre que la position du golfeur est inclinée par rapport à la verticale selon un angle pouvant varier d'un joueur à un autre.



FIG. 2.1 : Différentes phases de mouvement de tir de golf.

Le club de golf est l'élément central du mouvement de frappe. Il est constitué de plusieurs parties permettant la transmission du mouvement et de l'énergie vers la balle. Les principales composantes d'un club de golf sont présentées dans la Figure 2.2.

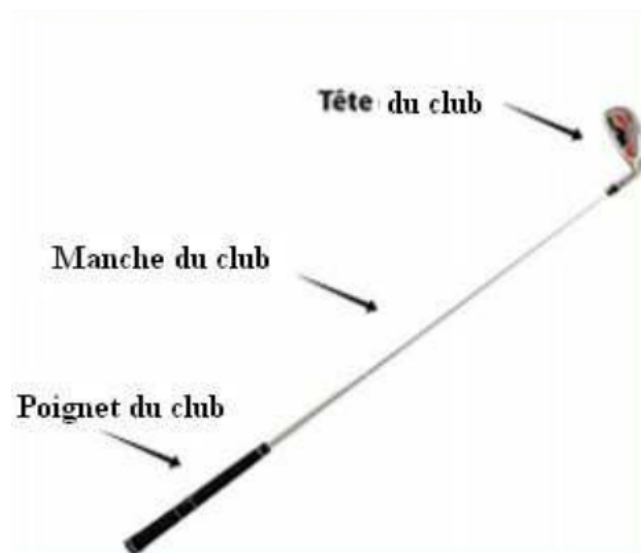


FIG. 2.2 : Club du jeu de golf.

L'étude de ce mouvement revêt un intérêt majeur en robotique, notamment pour la conception de robots golfeurs capables de reproduire fidèlement les gestes humains (voir chapitre 1). Sa modélisation permet également d'évaluer les performances dynamiques du système et d'analyser les stratégies de commande visant à améliorer la rapidité et la précision du mouvement. Les différentes phases du swing assurent une coordination efficace des mouvements articulaires, permettant une transmission optimale de l'énergie vers la balle. Ce principe a inspiré la conception du robot golfeur étudié dans ce travail donné par Figure 2.3, dans le but de reproduire un mouvement similaire au geste humain.

2.3 Prototype du robot golfeur

2.3.1 Choix du nombre de degrés de liberté

La conception du robot golfeur repose sur l'analyse du mouvement du bras d'un golfeur professionnel lors du tir, afin de définir la cible et la vitesse d'impact, puis de déterminer les couples nécessaires pour reproduire ce mouvement avec réalisme et précision, dans le but de concevoir un mécanisme anthropomorphe.

En pratique, le golfeur utilise les deux bras pour tenir le club, et plusieurs travaux ont étudié cette configuration, notamment celui de Hunt et al. [33] qui ont développé un robot à cinq degrés de liberté (5 ddl). Toutefois, cette architecture nécessite un grand nombre d'actionneurs, ce qui augmente le coût, le poids et la consommation énergétique. Pour réduire cette complexité, d'autres chercheurs tels que Xu et al. [34] ont proposé une architecture simplifiée en utilisant un seul bras et en ne considérant que les articulations de l'épaule et du poignet (Figure 2.3). Le robot obtenu est ainsi à deux degrés de liberté (2 ddl) où le bras et l'avant-bras forment le premier segment et le club constitue le second segment. Cette structure, jugée suffisante pour reproduire le mouvement a ensuite été améliorée par la suite [35],[36], toute en offrant un système plus simple, plus léger, moins coûteux et plus économe en énergie.

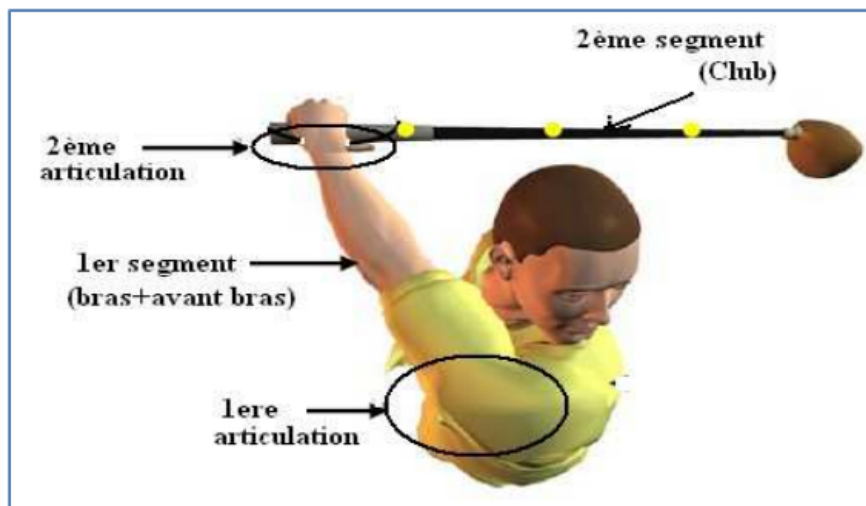


FIG. 2.3 : Structure articulaire et segments du robot golfeur.

Le mouvement du bras manipulateur est de nature hyper-dynamique, ce qu'un robot conventionnel ne peut généralement pas reproduire efficacement. La réalisation de ce mouvement repose donc sur l'analyse anatomique des articulations de l'épaule et du poignet du bras humain, afin de s'en inspirer pour établir un modèle correspondant, en définissant les plages de mouvement de chaque articulation ainsi que leurs interactions. Cette démarche permet ensuite de déterminer la conception de base et le mécanisme du robot.

2.3.2 Conception de base du robot

2.3.2.1 Éléments constitutifs du robot

Le mouvement du bras humain repose sur une structure ingénieuse dans laquelle l'articulation de l'épaule, la plus puissante, transmet progressivement l'énergie vers le coude et le poignet afin de réaliser des gestes très rapides, comme le swing de golf. Ce mécanisme est appelé *accélération par étapes*.

La conception du robot golfeur, illustrée par Figure (2.4), est basée sur ce principe, selon lequel le choix et le positionnement des servomoteurs ont été définis afin de concevoir un bras manipulateur hyper dynamique à deux degrés de liberté (2ddl), composé d'un bras et d'un club relié au poignet, adapté aux exigences du tir de golf.

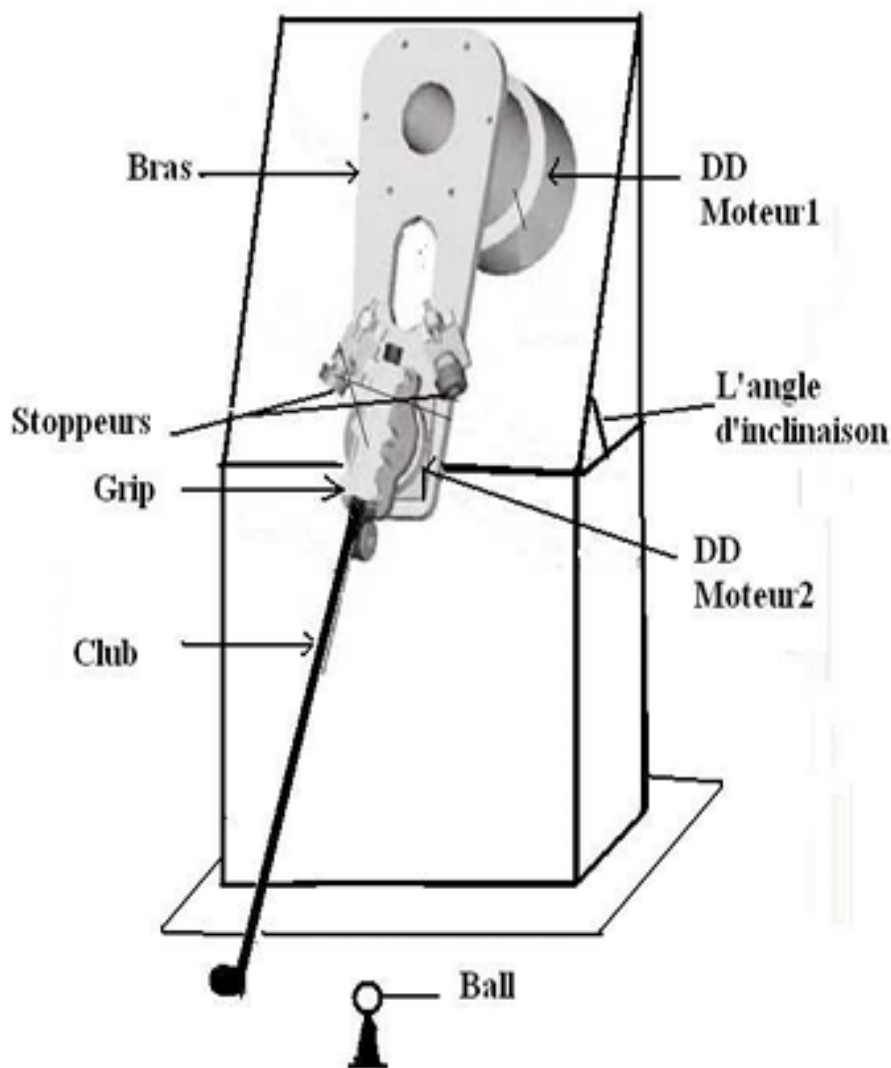


FIG. 2.4 : Prototype du robot golfeur.

Le mouvement ultra-rapide des deux articulations rotatoires est assuré par des moteurs à entraînement direct (DD moteur). L'actionneur (DD moteur 1) de la première articulation, reproduisant le mouvement de l'épaule, doit fournir un couple élevé afin d'entraîner l'ensemble du bras manipulateur, tandis que celui de la deuxième articulation (DD moteur 2), associée

au poignet, est plus petit et moins puissant et il délivre un faible couple . Ce dernier permet de considérer la seconde articulation comme passive, conduisant à un système supposé sous-actionné. Des stoppeurs mécaniques y sont intégrés afin de limiter le mouvement du poignet et de générer un couple passif contribuant aux phases d'accélération et de décélération du club.

La figure (2.4) présente les éléments constitutifs du robot comme suit :

- **Bras** : segment rigide représentant le bras et l'avant-bras du golfeur, dont le mouvement est de type rotoïde.
- **Poignet (ou grip)** : segment rigide assimilé au poignet du golfeur, également caractérisé par un mouvement rotoïde.
- **Club** : élément supposé rigide dans cette application, associé au poignet pour former le deuxième segment.
- **Stoppeurs** : dispositifs mécaniques assurant la limitation de l'amplitude de mouvement au niveau du poignet.
- **DD Moteur 1 et DD Moteur 2** : moteurs à entraînement direct commandant respectivement les mouvements de l'épaule et du poignet.
- **Angle d'inclinaison** : angle définissant l'inclinaison du plan de mouvement (position du golfeur) par rapport à la verticale.

2.3.2.2 Structure des stoppeurs

La plage de rotation de l'articulation du 2^e segment (poignet + club) du robot est limitée par des stoppeurs mécaniques afin d'éviter les contacts brusques entre les segments.

Parmi les structures des stoppeurs proposées dans la littérature pour les robots hyper dynamiques, celle de Ming et al. [37], donnée par Figure (2.5), permet de limiter l'amplitude de mouvement du poignet du robot golfeur.

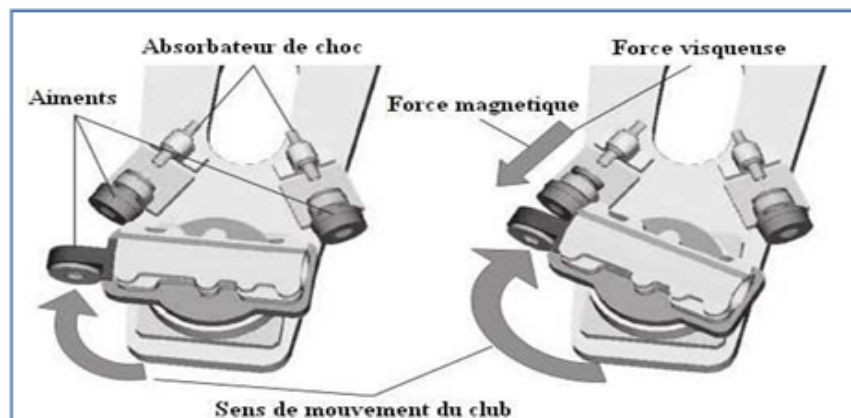


FIG. 2.5 : Structure des stoppeurs.

La Figure (2.5) montre que chaque stoppeur est constitué d'une paire d'aimants, jouant le rôle d'élément élastique non linéaire, ainsi que d'un absorbeur de choc. Lorsque le 2eme segment entre en contact avec un des deux stoppeurs, deux types de forces sont générées : une force élastique résultant de la répulsion magnétique entre les aimants, et une force visqueuse produite par l'absorbeur de choc.

Le rôle de l'élément élastique du stoppeur est d'augmenter la plage de mouvement de la deuxième articulation jusqu'à un maximum de 20° lorsque le 2eme segment atteint les extrémités des stoppeurs [37].

Le rôle de l'absorbeur de choc est d'amortir la collision entre les stoppeurs et le club en réduisant la vitesse angulaire de ce dernier.

Ces stoppeurs peuvent être modélisés par une structure mécanique équivalente, dans laquelle l'élément élastique est représenté par un ressort et l'absorbeur de choc par un amortisseur, comme illustré par la Figure (2.6) [38].

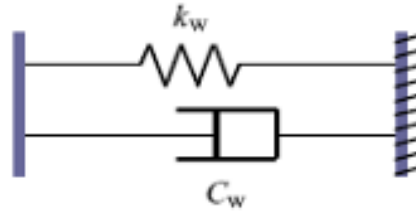


FIG. 2.6 : Structure équivalente d'un stoppeur mécanique.

2.3.2.3 Intérêt des moteurs à entraînement direct

Le contrôle de la dynamique d'un système exige une maîtrise précise des efforts des actionneurs. Cependant, les bras manipulateurs à servomoteurs conventionnels sont limités pour les applications rapides et précises, en raison des transmissions mécaniques, des vibrations, du bruit et des frottements, qui dégradent les performances.

Les limitations des servomoteurs conventionnels ont conduit au développement des moteurs à entraînement direct (DD), qui appliquent directement des couples élevés à la charge en supprimant les transmissions intermédiaires. Cette technologie offre de nombreux avantages, notamment une meilleure intégration, un rendement élevé, une réduction du bruit et de la maintenance, ainsi qu'une conception simplifiée et plus légère. Elle permet également une grande dynamique, une haute précision, ainsi qu'une rigidité et une fiabilité accrues, tout en éliminant les problèmes liés aux réducteurs et en favorisant l'intégration fonctionnelle.

C'est grâce à l'ensemble de ces qualités que ce type de moteur s'est largement imposé dans le domaine industriel.

2.4 Principe de fonctionnement du robot

Le mouvement complet réalisé par le robot golfeur lors d'un tir peut être décomposé en trois périodes principales [38], comme illustré à la Figure 2.7.

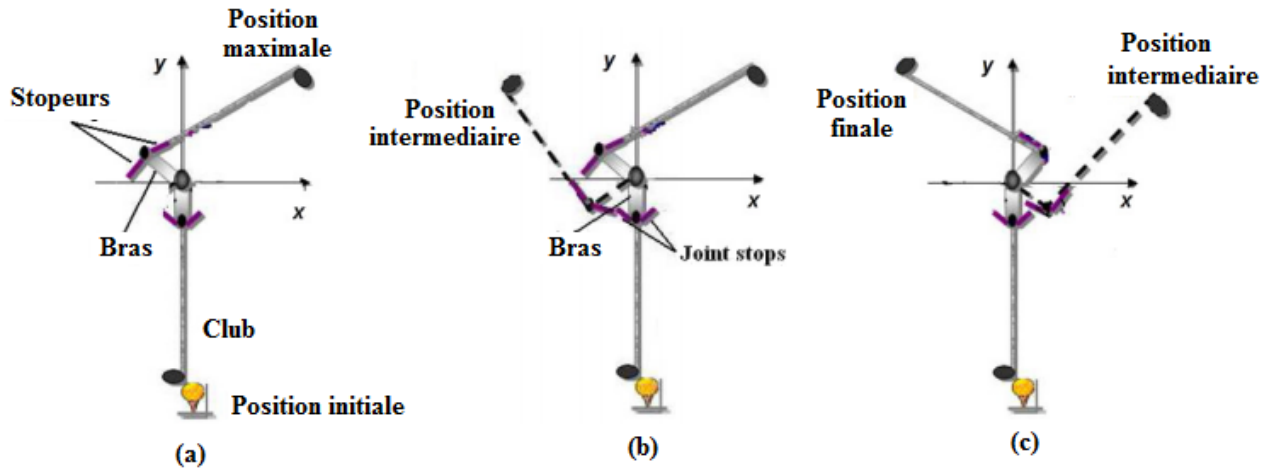


FIG. 2.7 : Mécanisme du robot golfeur.(a) : Période de pré-impact. (b) : Période d'impact. (c) : Période de post-impact

- **Période de pré-impact : de la position initiale à la position maximale (Figure 2.7.a) :**

Durant cette période, la vitesse du bras manipulateur reste relativement faible, et son comportement est proche de celui d'un robot conventionnel. Chaque actionneur doit fournir un couple suffisant pour amener le segment mobile de la position initiale jusqu'à la position maximale. La valeur de ce couple dépend principalement de la vitesse souhaitée au moment de l'impact.

- **Période d'impact : de la position maximale à la position d'impact (Figure 2.7.b) :**

Cette période est la plus critique pour la reproduction du mouvement d'un golfeur professionnel, car le manipulateur doit reproduire un comportement fortement dynamique. Au départ, le club est maintenu en position maximale par un premier stoppeur. Les deux segments sont ensuite accélérés par les couples fournis par les actionneurs jusqu'à une position intermédiaire. À ce stade, le club se détache du stoppeur, qui génère alors un couple passif venant s'ajouter à celui du deuxième actionneur pour contribuer à l'accélération initiale du club.

Comme ce couple reste faible, un transfert d'énergie s'effectue de la première articulation vers la deuxième sous forme de couple, appelé couple dynamique d'anticipation. Ainsi, l'accélération de la première articulation diminue légèrement, tandis que celle de la deuxième augmente, entraînant une augmentation progressive de la vitesse jusqu'à atteindre son maximum au moment de l'impact, qui constitue l'objectif principal. Ce phénomène est connu sous le nom d'accélération par étapes.

- **Période de post-impact : de la position d'impact à la position finale (Figure 2.7.c) :**

Cette période suit celle d'impact. Elle est caractérisée par une décélération progressive des deux segments jusqu'à atteindre une position intermédiaire. Le club est alors bloqué par un second stoppeur, qui génère un couple passif contribuant à amorcer sa décélération.

À ce stade, le couple dynamique d'anticipation issu du premier actionneur intervient afin de faciliter le ralentissement du robot manipulateur et permettre l'arrêt du club à la position finale. Ainsi, les deux segments atteignent simultanément l'arrêt complet, marquant la fin de

tir de golf.

Les trois périodes du mouvement complet du tir de golf (swing) peuvent être représentées par Figure (2.8).

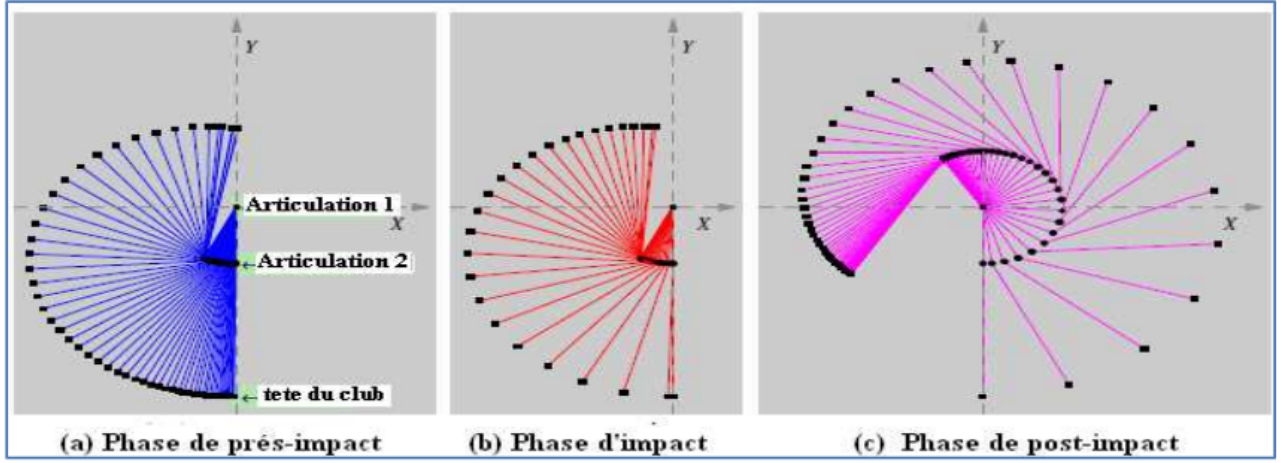


FIG. 2.8 : Swing du robot golfeur.

2.5 Modélisation du robot golfeur

Dans ce travail, le modèle dynamique du robot golfeur, donné par Figure (2.4), est développé à partir du formalisme d'Euler-Lagrange [39], afin d'obtenir le modèle dynamique direct. Celui-ci permet de relier les couples et forces des actionneurs aux positions, vitesses et accélérations des articulations via des équations différentielles non linéaires. En négligeant les frottements, l'expression des couples est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (2.1)$$

Pour une articulation rotoïde, la variable généralisée est l'angle $q_i = \theta_i$, tandis que pour une articulation prismatique, elle correspond à la translation $q_i = d_i$.

2.5.1 Hypothèses du modèle

Lors de la détermination du modèle dynamique du robot golfeur, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- (H1) : Le robot golfeur est modélisé avec deux degrés de liberté (2 ddl), correspondant à deux articulations rotoïdes (épaule et poignet).
- (H2) : La rotation de chaque articulation est assurée par un servomoteur à entraînement direct, générant un couple dynamique.
- (H3) : Les stoppeurs produisent un couple passif.
- (H4) : Le deuxième segment (le club) est supposé rigide.
- (H5) : Les frottements sont négligés.

2.5.2 Modèle dynamique

le modèle du robot golfeur est présenté par Figure (2.9), avec des articulations de type rototide. À partir de cette configuration, on peut déterminer les coordonnées de l'articulation de l'épaule (x_1, y_1) dans le repère (oxy) , ainsi que celles de l'articulation du poignet (x_2, y_2) dans le repère (ox_1y_1) , ce qui permet d'obtenir les équations ci-dessous.

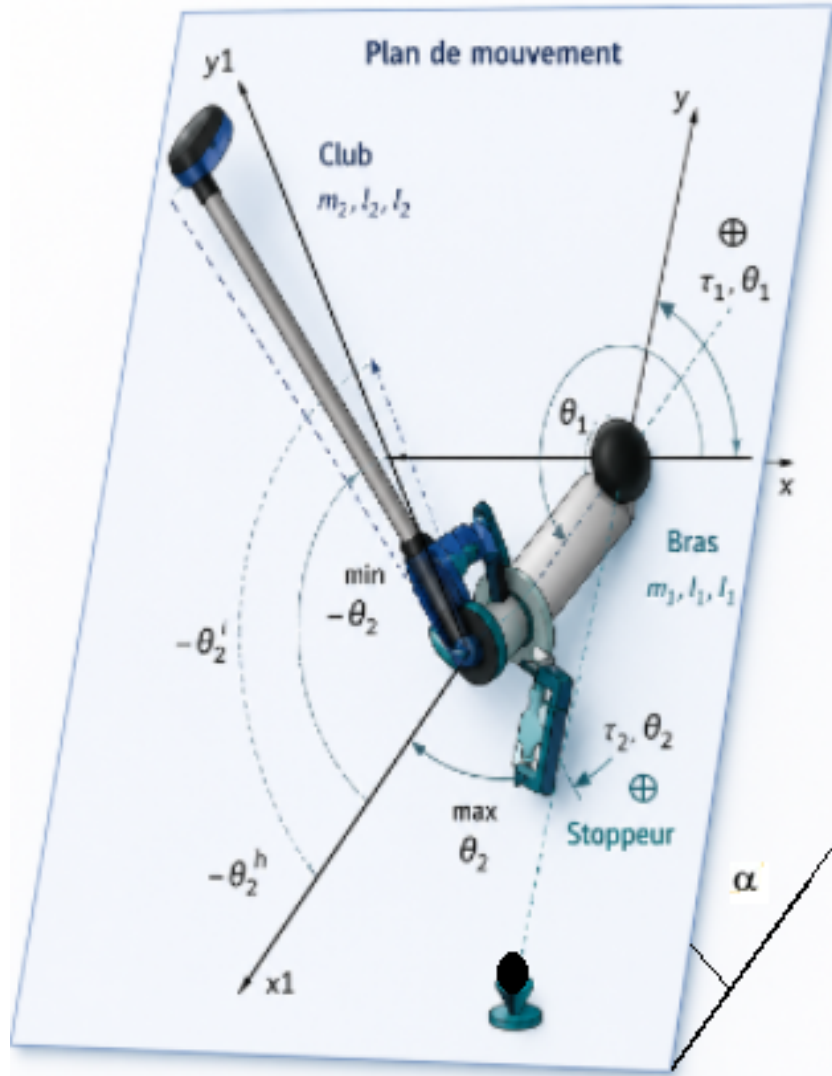


FIG. 2.9 : Modèle du robot golfeur.

On obtient ainsi les relations suivantes :

$$\begin{cases} x_1 = l_{g1} \sin \theta_1 \\ y_1 = l_{g1} \cos \theta_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Et :

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_{g2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec :

- θ_i : position angulaire du segment i (rad),

- $\dot{\theta}_i$: vitesse angulaire du segment i (rad/s),
- l_i : longueur du segment i (m),
- l_{gi} : longueur du centre de gravité (m).

Les dérivées des équations (2.2) et (2.3) donnent respectivement les équations (2.4) et (2.5) :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = l_{g1}\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_1 = l_{g1}\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (2.4)$$

Et :

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -l_{g2} \sin \theta_1 - l_{g2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = l_{g2} \sin \theta_1 + l_{g2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (2.5)$$

L'application du formalisme d'Euler-Lagrange conduit aux équations suivantes :

– L'énergie cinétique (E_c)

$$E_c = \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (2.6)$$

Tel que :

I_i : Inertie du segment i (kg.m²).

m_i : Masse de du segment i . v_i : vitesse du centre de gravité du segment du i (m/s).

Avec :

$$\begin{cases} v_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \\ v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \end{cases} \quad (2.7)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} v_1^2 = l_{g1}^2 \dot{\theta}_1^2 \\ v_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 \dot{\theta}_2^2 + 2l_{g2}^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 + 2l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

– L'énergie potentielle (E_p)

$$E_p = m_1 g y_1 + m_2 g y_2 \quad (2.9)$$

Avec : g est l'accélération de gravité du segment i (m.s⁻²).

Cela donne :

$$E_p = m_1 g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \quad (2.10)$$

— Lagrangien (L)

$$L = E_c - E_p \quad (2.11)$$

L'équation (2.11) donne après calcul :

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{\theta}_2^2 + I_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_1l_{g2}^2\dot{\theta}_1^2 - \dots \\
& m_1gl_{g1}\sin\theta_1 - m_2g(l_1\sin\theta_1 + l_{g2}\sin(\theta_1 + \theta_2)) + \dots \\
& \frac{1}{2}m_2\left(l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2\dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2\dot{\theta}_2^2 + 2l_{g2}^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + 2l_1l_{g2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos\theta_2 + 2l_1l_{g2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos\theta_2\right) \quad (2.12)
\end{aligned}$$

L'équation d'Euler-Lagrange décrivant la dynamique du robot golfeur à deux degrés de liberté est donnée par :

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}, \quad (i = 1, 2) \quad (2.13)$$

Avec :

$$\Gamma_{1,2} = [\tau_1 \quad \tau_2 \text{ actif}]^T \quad (2.14)$$

Représente les couples des servomoteurs.

$$\text{D'où : } \begin{cases} \tau_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \\ \tau_{2\text{actif}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \end{cases}$$

Nous calculons :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -m_1g(L_{g1}\cos\theta_1) - m_2g(L_1\cos\theta_1 + L_{g2}\cos(\theta_1 + \theta_2)) \quad (2.15)$$

Ce qui donne :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = I_1\dot{\theta}_1 + I_2\dot{\theta}_1 + I_2\dot{\theta}_2 + m_1l_{g1}^2\dot{\theta}_1 + m_2\left(l_1^2\dot{\theta}_1 + l_{g2}^2\dot{\theta}_1 + l_{g2}^2\dot{\theta}_2 + 2l_1l_{g2}\dot{\theta}_1\cos\theta_2 + l_1l_{g2}\dot{\theta}_2\cos\theta_2\right) + \dots$$

$$m_2\left(l_1^2\ddot{\theta}_1 + l_{g2}^2\ddot{\theta}_1 + l_{g2}^2\ddot{\theta}_2 + 2l_1l_{g2}\ddot{\theta}_1\cos\theta_2 - 2l_1l_{g2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + l_1l_{g2}\ddot{\theta}_2\cos\theta_2 - l_1l_{g2}\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2\right) \quad (2.16)$$

On obtient donc :

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1}$$

$$\tau_1 = (I_1 + I_2 + m_1l_{g1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{g2}^2 + 2l_1l_{g2}\cos\theta_2))\ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2(l_{g2}^2 + l_1l_{g2}\cos\theta_2))\ddot{\theta}_2 + \dots \quad (2.17)$$

$$(-m_2l_1l_{g2}\sin\theta_2)\dot{\theta}_2^2 + 2(-m_2l_1l_{g2}\sin\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dots$$

$$m_1gl_{g1}\cos\theta_1 + m_2g(l_1\cos\theta_1 + l_{g2}\cos(\theta_1 + \theta_2))$$

Nous calculons aussi :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2\left(l_1l_{g2}\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 + l_1l_{g2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2\right) - m_2gl_{g2}\cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.18)$$

Ce qui donne :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = I_2 \dot{\theta}_2 + I_2 \dot{\theta}_1 + m_2 \left(l_{g2}^2 \dot{\theta}_2 + l_{g2}^2 \dot{\theta}_1 + l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \right) \quad (2.19)$$

Et :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = I_2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 \left(l_{g2}^2 \ddot{\theta}_2 + l_{g2}^2 \ddot{\theta}_1 + l_1 l_{g2} \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - l_1 l_{g2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \right) \quad (2.20)$$

On obtient donc :

$$\tau_{2actif} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2}$$

$$\tau_{2actif} = (I_2 + m_2 (l_{g2}^2 + l_1 l_{g2} \cos \theta_2)) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 l_{g2}^2) \ddot{\theta}_2 + (m_2 l_1 l_{g2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + m_2 g l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.21)$$

En robotique, lorsque les articulations du robot manipulateur sont de type rotoïde, l'expression des couples, donné par (2.13), peut être formulée sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{\Gamma}_i = M(\boldsymbol{\theta}) \ddot{\boldsymbol{\theta}} + C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \dot{\boldsymbol{\theta}} + G(\boldsymbol{\theta}), (i = 1, 2) \quad (2.22)$$

avec :

- $\mathbf{\Gamma}_i \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$: vecteur des couples des servomoteurs,
- $\ddot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$: vecteur des accélérations angulaires,
- $M(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$: matrice d'inertie,
- $C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$: matrice des forces centrifuges et de Coriolis,
- $G(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$: vecteur de force de gravité.

L'équation (2.22) représente le modèle dynamique du manipulateur avec :

$$M(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} m_1 l_{g1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{g2}^2 + 2m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + I_1 + I_2 & m_2 l_{g2}^2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + I_2 \\ m_2 l_{g2}^2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + I_2 & m_2 l_{g2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} -2m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 & -m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\ m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$G(\boldsymbol{\theta}) = [m_1 \bar{g} l_{g1} \cos \theta_1 - m_2 \bar{g} l_1 \cos \theta_1 - m_2 \bar{g} l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad m_2 \bar{g} l_{g2} \cos(\theta_1 + \theta_2)]^T \quad (2.25)$$

Le plan de mouvement du robot golfeur est incliné par rapport à la verticale d'un angle α (rad). Par conséquent, le vecteur de gravité $\bar{g}$ s'écrit :

$$\bar{g} = g \times \sin \alpha \quad (2.26)$$

Le modèle obtenu par l'équation (2.22) est non linéaire et fortement couplé.

2.5.2.1 Modélisation du couple passif des stoppeurs

Les stoppeurs permettent d'élargir la plage de mouvement du club d'un angle de 20° lorsqu'il est en contact avec eux. Les conditions cinématiques de la deuxième articulation sont définies par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \theta_2^{lb} \leq \theta_2 \leq \theta_2^{\min} \\ \theta_2^{\max} \leq \theta_2 \leq \theta_2^{ub} \end{cases} \quad (2.27)$$

avec : Avec :

- $\theta_2^{\min}$: Position angulaire minimale de la 2ème articulation.
- $\theta_2^{\max}$: Position angulaire maximale de la 2ème articulation.
- θ_2^{lb} : Angle minimal que la 2ème articulation peut l'atteindre due au stoppeur.
- θ_2^{ub} : Angle maximal que la 2ème articulation peut l'atteindre due au stoppeur.

On donne :

$$\begin{cases} \theta_2^{lb}(\text{deg}) = \theta_2^{\min}(\text{deg}) - 20(\text{deg}) \\ \theta_2^{ub}(\text{deg}) = \theta_2^{\max}(\text{deg}) + 20(\text{deg}) \end{cases} \quad (2.28)$$

Lorsque le club entre en contact avec l'un des stoppeurs, celui-ci génère un couple passif maximal $\tau_{2passif}^{\max}$ ou minimal $\tau_{2passif}^{\min}$, qui s'ajoute au couple actif τ_{2actif} fourni par DD moteur 2, donnant ainsi le couple total $\tau_2(t)$.

Le couple passif a pour rôle de contribuer initialement à l'accélération ($\tau_{2passif}^{\max}$) ou à la décélération ($\tau_{2passif}^{\min}$) du club.

L'équation du couple $\tau_2(t)$ est donnée donc par :

$$\tau_2 = \begin{cases} \tau_{2actif}(t) + \tau_{2passif}^{\min}, & \theta_2 \in [\theta_{2lb}, \theta_{2\min}] \\ \tau_{2actif}(t), & \theta_2 \in [\theta_{2\min}, \theta_{2\max}] \\ \tau_{2actif}(t) + \tau_{2passif}^{\max}, & \theta_2 \in [\theta_{2\max}, \theta_{2ub}] \end{cases} \quad (2.29)$$

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le robot golfeur ainsi que le principe de fonctionnement de son mécanisme. Nous avons ensuite établi son modèle dynamique, caractérisé par un comportement non linéaire et un fort couplage entre les différentes articulations.

Ce modèle dynamique constitue une base fondamentale pour la conception des stratégies de commande robustes. Il servira notamment au développement et à la synthèse des lois de commande par mode glissant qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Théorie des commandes appliquées au robot Golfeur

3.1 Introduction

La commande des robots manipulateurs hyperdynamiques constitue un domaine de recherche particulièrement actif et suscite un intérêt scientifique croissant, comme en témoignent les nombreux travaux réalisés dans ce contexte [38] , [40] , [41] , [42] . En raison de leurs dynamiques fortement non linéaires, de leurs mouvements ultra rapides ainsi que de leur sensibilité aux perturbations externes et aux incertitudes paramétriques, le développement de stratégies de commande robustes et performantes représente un enjeu majeur pour garantir la stabilité et la précision de ces systèmes robotiques.

Dans ce chapitre, nous présentons les principes fondamentaux de deux approches de commande largement utilisées dans le domaine de la robotique avancée, à savoir la commande robuste par mode glissant (*Sliding Mode Control* — SMC) et la commande basée sur la logique floue (*Fuzzy Logic Control* — FLC). La commande SMC repose sur le modèle mathématique du système et se distingue par sa robustesse vis-à-vis des perturbations externes et des variations paramétriques. En revanche, la logique floue s'appuie principalement sur l'expertise humaine et les connaissances heuristiques afin de traiter les systèmes complexes ou difficilement modélisables.

3.2 Aperçu des stratégies de commande appliquées au robot golfeur

De nombreux travaux de recherche se sont intéressés au contrôle du mouvement de swing des robots golfeurs. Par exemple, Xu et al. [43] ont proposé un contrôleur PID afin de réduire l'erreur de poursuite du robot. Dans les études [35] et [36], une commande énergétique a été utilisée pour atteindre une vitesse de frappe spécifique au moment d'impact du swing. Par ailleurs, une commande PD ainsi qu'une commande PD avec compensation de la gravité et des couples de couplage (PGCTC) ont été développées afin de ralentir progressivement le mouvement et d'arrêter le swing à une position finale prédéfinie, dans le but de résoudre le problème lié

à la phase post-impact. Dans les études [41] , [42] , [44] et [45], les auteurs ont également évalué, en simulation sur un robot golfeur, plusieurs lois de commande classiques utilisées en robotique conventionnelle, notamment la commande point à point, la commande de poursuite de trajectoire et la commande par découplage non linéaire.

Cependant, les vitesses ultra-rapides caractérisant ce type de robot rendent les effets des couples de couplage non linéaires particulièrement significatifs. Dans ces conditions, les commandes linéaires montrent leurs limites, notamment en matière de rejet des perturbations externes et de compensation des incertitudes paramétriques, ce qui peut dégrader les performances globales du système. Le recours à des stratégies de commande robuste devient alors indispensable.

Parmi celles-ci, la commande par modes glissants (SMC) se distingue par sa capacité à assurer une forte robustesse vis-à-vis des perturbations externes ainsi qu'une faible sensibilité aux variations paramétriques [46]. Toutefois, cette approche présente un inconvénient majeur : le phénomène de *chattering* à haute fréquence, causé par la nature discontinue de la loi de commande lorsque l'état du système évolue à proximité de la surface de glissement.

Dans le cadre de ce mémoire, la logique floue sera associée à la commande par mode glissant afin de concevoir un contrôleur flou par mode glissant (FSMC). Cette stratégie hybride combine la robustesse du contrôleur SMC, permettant de rejeter les perturbations externes et de compenser les imprécisions de modélisation, avec les capacités de la logique floue à améliorer l'amortissement du système et à réduire le phénomène de *chattering*. À cet effet, un système d'inférence floue sera utilisé pour remplacer la surface de glissement conventionnelle de la commande SMC.

3.3 Théorie de la commande par mode glissant

3.3.1 Évolution de la commande SMC

La commande par modes glissants s'inscrit dans la théorie des systèmes à structure variable. Les premières études consacrées à cette approche remontent aux années 1950 avec les travaux pionniers d'Anosov [47], de Tzypkin [48] ainsi que d'Emelyanov [49] , [50] en Union Soviétique, sans oublier les recherches de Hamel [51] en France sur les systèmes à relais.

L'essor de cette théorie s'est accentué au début des années 1960 grâce aux contributions de Filippov [52], qui a développé une méthode de traitement des équations différentielles présentant des discontinuités dans leur second membre. Par la suite, les recherches d'Emelyanov [50], d'Itkis [53] et surtout d'Utkin [54], considéré comme l'un des principaux initiateurs de la théorie moderne des modes glissants, ont permis d'étendre et de structurer cette commande.

L'approche SMC a rapidement attiré l'attention de la communauté scientifique en automatique en raison de sa simplicité de conception et de ses propriétés de robustesse [55], [56]. En effet, la commande par modes glissants se distingue principalement par :

- une mise en œuvre relativement simple ;
- une bonne résistance aux perturbations externes et aux incertitudes paramétriques ;

- une grande diversité d'applications dans des domaines variés tels que la robotique, la mécanique et les systèmes électrotechniques.

Grâce à ces avantages, cette stratégie de commande a été appliquée dans de nombreux travaux relatifs à la stabilisation des systèmes dynamiques [57] , [58] , au suivi de trajectoires [59], [60], [61], [62] , au suivi de modèles de référence [63] ainsi qu'à la conception d'observateurs d'état [64], [65], [66].

3.3.2 Concept et principe de la commande SMC

La commande par modes glissants est une approche de commande robuste qui repose sur la contrainte de la trajectoire d'état à évoluer selon une dynamique imposée [67]. Son principe de fonctionnement peut être décrit à travers les étapes suivantes, illustrées par la Figure 3.1 :

- **Étape 1 : *Phase de convergence***

La loi de commande est conçue de manière à forcer les trajectoires du système à rejoindre une surface $S(x, t) = 0$ prédéfinie dans l'espace d'état, appelée surface de glissement. Durant cette étape, le système évolue depuis ses conditions initiales vers cette surface dans un temps fini (ou quasi-fini selon la conception).

- **Étape 2 : *Atteinte de la surface de glissement***

Lorsque la trajectoire atteint la surface de glissement, la condition $S(x, t) = 0$ est satisfaite. À partir de ce point, la dynamique du système change de régime et devient contrainte par cette surface choisie.

- **Étape 3 : *Régime de glissement***

Le système évolue sur la surface de glissement, où la loi de commande agit de manière à maintenir l'état sur celle-ci malgré les perturbations et les incertitudes. La dynamique du système est alors réduite et simplifiée.

- **Étape 4 : *Régime permanent (voisinage de l'équilibre)***

Dans cette phase, le système évolue autour du point d'équilibre (origine). Les performances de la commande (précision, stabilité et robustesse) sont alors évaluées en régime établi.

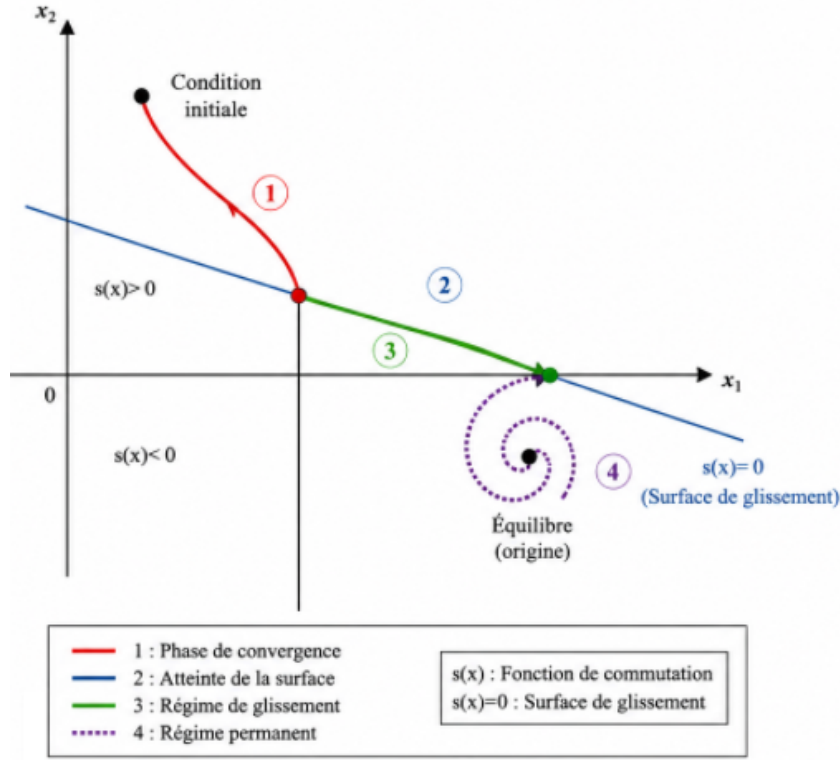


FIG. 3.1 : Principe de fonctionnement de la commande SMC.

3.3.3 Conception de la commande par mode de glissement

La conception d'une commande par mode glissant repose généralement sur une démarche structurée en trois étapes fortement interdépendantes [67] :

- La sélection de la surface de glissement ;
- L'établissement des conditions assurant la convergence vers cette surface ;
- La synthèse de la loi de commande permettant à la fois d'atteindre la surface et de maintenir le régime de glissement.

3.3.3.1 Sélection de la surface de glissement

La fonction $S(x, t)$ est appelée surface de glissement. Selon l'ordre du système à commander, elle peut correspondre à une droite ou à une hypersurface.

Slotine a proposé une formulation générale basée sur une fonction scalaire des surfaces de glissement dans le plan de phase (Figure 3.2). Cette approche vise à garantir la convergence d'une variable d'état $x(t)$ vers sa valeur désirée $x_d(t)$. La fonction est définie par l'équation suivante [56] :

$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (3.1)$$

Cette surface est particulièrement utilisée en pratique, car elle permet de réduire le nombre de paramètres de synthèse de la surface à un seul coefficient.

Avec :

- $e(x)$: l'erreur entre la variable à réguler x et la valeur désirée x_d ;
- λ_x : un coefficient positif représentant la pente de la surface de glissement ;
- r : le degré relatif du système, correspondant au nombre de dérivations nécessaires de la surface pour faire apparaître explicitement la commande.

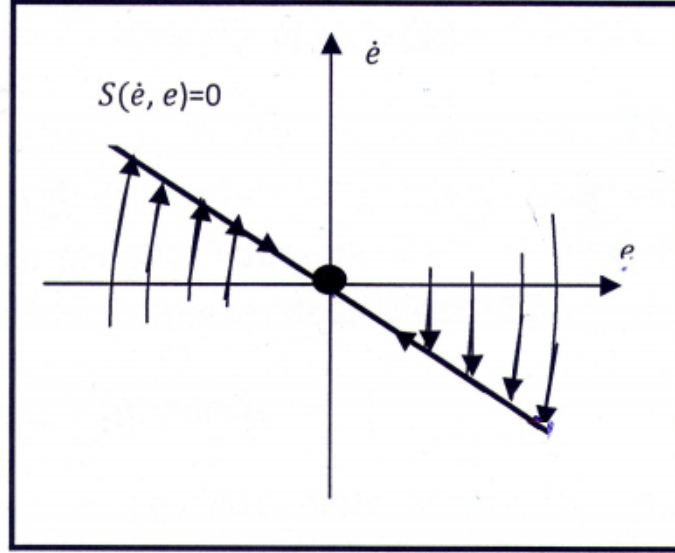


FIG. 3.2 : Surface de glissement dans le plan de phase.

3.3.3.2 Condition d'existence de convergence

Les conditions d'existence de la convergence constituent l'ensemble des critères garantissant que la dynamique du système converge vers la surface de glissement et y demeure, indépendamment des perturbations externes. Deux approches principales sont généralement considérées pour caractériser le mode de convergence de l'état du système.

a- Fonction directe de commutation

Cette condition de convergence, dite d'attractivité, a été introduite et analysée par Emelyanov et Utkin [68]. Elle consiste à imposer à la surface de glissement une dynamique assurant la convergence de l'erreur vers zéro. Elle s'exprime comme suit :

$$\dot{S}(x, t) > 0 \quad \text{lorsque} \quad S(x, t) < 0$$

$$\dot{S}(x, t) < 0 \quad \text{lorsque} \quad S(x, t) > 0$$

Cette condition peut être donnée autrement par :

$$S(x, t) \dot{S}(x, t) < 0 \tag{3.2}$$

b- Fonction de Lyapunov

La détermination du domaine de glissement repose sur l'étude de la stabilité du système en régime glissant à l'aide de la théorie de Lyapunov. Une fonction de Lyapunov $V(x)$ strictement

positive $V(x) > 0$ est choisie de sorte que sa dérivée temporelle soit négative $\dot{V}(x) < 0$, afin d'assurer la stabilité et la convergence du système vers la surface de glissement. Dans la commande par mode glissant, une fonction scalaire $S(x, t)$ est définie pour garantir la convergence de la variable contrôlée vers sa référence, tandis que le carré de cette surface est généralement utilisé comme fonction candidate de Lyapunov :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x, t) \quad (3.3)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x, t) \dot{S}(x, t) \quad (3.4)$$

Afin d'assurer la décroissance de la fonction de Lyapunov $V(x)$, il est nécessaire que sa dérivée temporelle soit strictement négative. Cette condition est satisfaite lorsque la relation (3.2) est vérifiée.

L'équation (3.3) montre que le carré de la distance à la surface de glissement, représenté par $S^2(x, t)$, décroît continuellement au cours du temps, ce qui contraint les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement depuis les deux côtés.

3.3.3.3 Détermination de la commande

La commande par mode glissant comprend en général deux termes [68] :

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_n(t) \quad (3.5)$$

Avec :

- $U_{eq}(t)$: un terme continu, appelé commande équivalente ;
- $U_n(t)$: un terme discontinu, appelé commande de commutation.

a- Commande de commutation $U_n(t)$

La commande de commutation permet de maintenir le point de fonctionnement au voisinage de la surface de glissement. Son rôle principal est d'assurer le respect des conditions d'attractivité et de garantir la convergence des trajectoires vers la surface. Cette commande est définie par l'expression suivante :

$$U_n(t) = -K (S(x, t)) \quad (3.6)$$

Le gain K est choisi de manière à assurer la stabilité du système, améliorer la rapidité de convergence et compenser les perturbations externes qui influent sur le système.

La fonction $(S(x, t))$ est définie par l'expression mathématique suivante :

$$(S(x, t)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S(x, t) > 0 \\ 0 & \text{si } S(x, t) = 0 \\ -1 & \text{si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

La fonction signe, illustrée à la Figure 3.3, entraîne une commutation de la commande U_n entre deux niveaux distincts, $+K$ et $-K$.

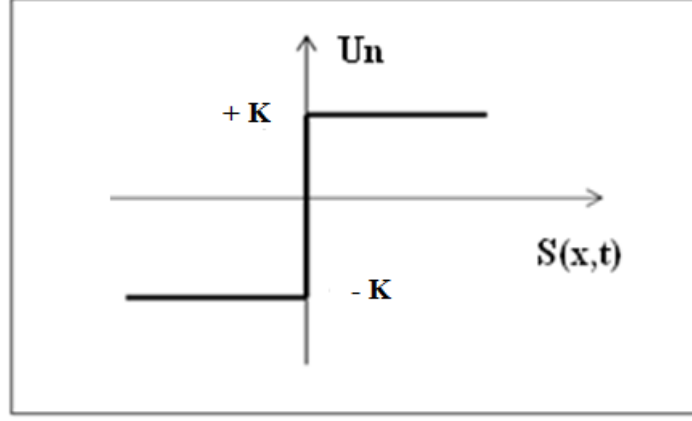


FIG. 3.3 : Représentation de la commande de commutation.

b- Commande équivalente $U_{eq}(t)$

La méthode proposée par Utkin repose sur l'hypothèse qu'en régime de glissement $S(x, t) = 0$, le système se comporte comme s'il était commandé par une commande appelée commande équivalente. Cette commande correspond au mode glissant idéal, dans lequel le point de fonctionnement demeure sur la surface de glissement tout en vérifiant la condition $\dot{S}(x, t) = 0$. Autrement dit, la surface de glissement reste invariante au cours du temps [68].

Afin de déterminer l'expression analytique de la commande équivalente U_{eq} , nous considérons un système représenté dans l'espace par son équation d'état suivante :

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t) U(t) \quad (3.8)$$

La dérivée de la surface donnée par l'équation (3.1) est :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3.9)$$

En remplaçant (3.5) et (3.8) dans (3.9), on trouve :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \left[A(x, t) + B(x, t) U_{eq}(t) \right] + \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} B(x, t) U_n(t) \quad (3.10)$$

En régime de glissement et en fonctionnement permanent, la surface de glissement est nulle $S(x, t) = 0$. Par conséquent, sa dérivée ainsi que la partie discontinue de la commande deviennent également nulles :

$$U_n(t) = 0 \quad \dot{S}(x, t) = 0 \quad (3.11)$$

En remplaçant (3.11) dans (3.10), on obtient l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq}(t) = - \left[\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} B(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} A(x, t) \quad (3.12)$$

Pour que la commande équivalente puisse être définie, la surface de glissement doit vérifier

la condition suivante :

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B(x,t) \neq 0 \quad (3.13)$$

Pendant le mode de convergence, en remplaçant dans (3.10) la commande équivalente par son expression donnée par (3.12), on obtient l'expression suivante pour la dérivée de la surface de glissement :

$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B(x,t) \cdot U_n(x,t) \quad (3.14)$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (3.2) devient :

$$S(x,t) \cdot \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B(x,t) \cdot U_n(t) < 0 \quad (3.15)$$

Pour satisfaire cette condition (3.15), le signe de $U_n(t)$ doit être opposé à celui de $S(x,t) \cdot \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B(x,t)$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais illustrée par la Figure 3.3 et donnée par l'équation (3.6) avec le signe de K différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$.

c- Commande SMC $U(t)$

La commande du contrôleur à mode glissant $U(t)$ est constituée de deux composantes $U_{eq}(t)$ et $U_n(t)$ et peut être illustrée par la Figure 3.4.

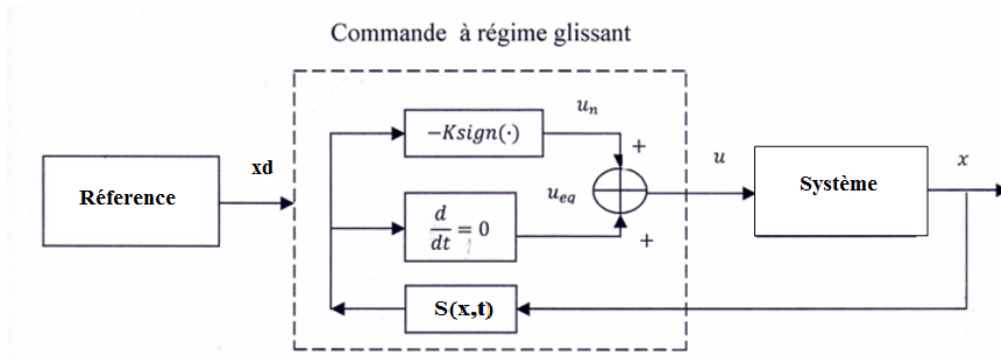


FIG. 3.4 : Schéma bloc de la commande par mode glissant.

3.3.4 Problème du phénomène de Chattering

3.3.4.1 Définition du phénomène

L'utilisation de la fonction signe entraîne une commutation rapide de la commande U_n donnée par (3.6) entre deux valeurs $\pm K$ avec une fréquence théoriquement infinie. Ce qui, en présence d'imperfections physiques, génère un phénomène de *chattering* (réticence) schématisé par la Figure 3.5. Ce dernier se traduit par de fortes oscillations autour de la surface de glissement.

Le phénomène de réticence constitue ainsi un inconvénient majeur qu'il ne faut pas négliger. Même si un filtrage en sortie du processus peut en atténuer les effets, il peut exciter des dynamiques de haute fréquence non prises en compte lors de la modélisation du système, ce qui peut dégrader les performances et, dans certains cas, conduire à l'instabilité du système.

Par ailleurs, il provoque des oscillations mécaniques importantes au niveau des actionneurs, entraînant une usure prématurée ainsi que des pertes énergétiques non négligeables dans les circuits de puissance électrique. Afin de réduire ou d'éliminer ce phénomène, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature.

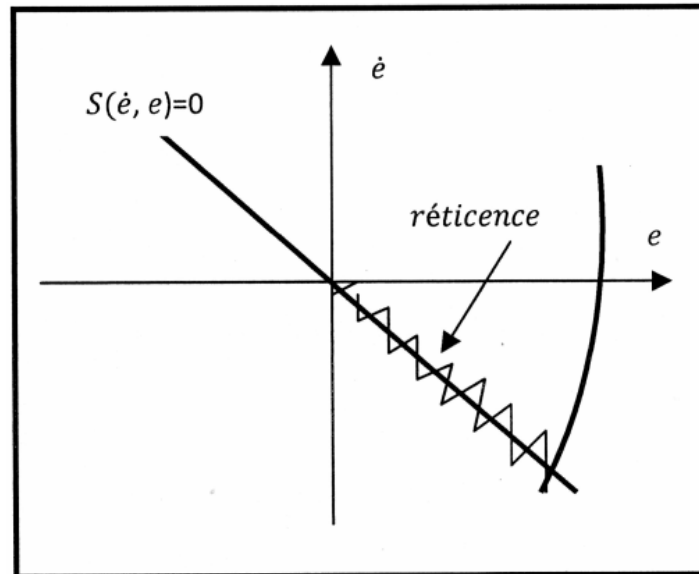


FIG. 3.5 : Phénomène de chattering.

3.3.4.2 Suppression du phénomène

Le phénomène de *chattering* peut être atténué ou éliminé en utilisant plusieurs stratégies de commande, dont l'objectif principal est de lisser la commande en réduisant les commutations brusques tout en conservant la robustesse du mode glissant. Les principales solutions sont :

- Remplacement de la fonction signe par une des fonctions continues (saturation, sigmoïde), présentées dans la Figure 3.6, afin de réduire les commutations brutales.
- Utilisation d'une inférence floue à la place de la fonction signe dans les commandes par mode glissant. **Cette solution sera adoptée dans notre travail.**
- Recours aux modes glissants d'ordre supérieur pour supprimer la discontinuité de la loi de commande.
- Utilisation de gains adaptatifs pour ajuster l'intensité de la commande.
- Estimation des perturbations à l'aide d'observateurs afin de les compenser plus progressivement.
- Intégration de techniques intelligentes (logique floue, réseaux neuronaux) pour adoucir la loi de commande.
- Application de filtres sur la commande pour atténuer les composantes hautes fréquences.

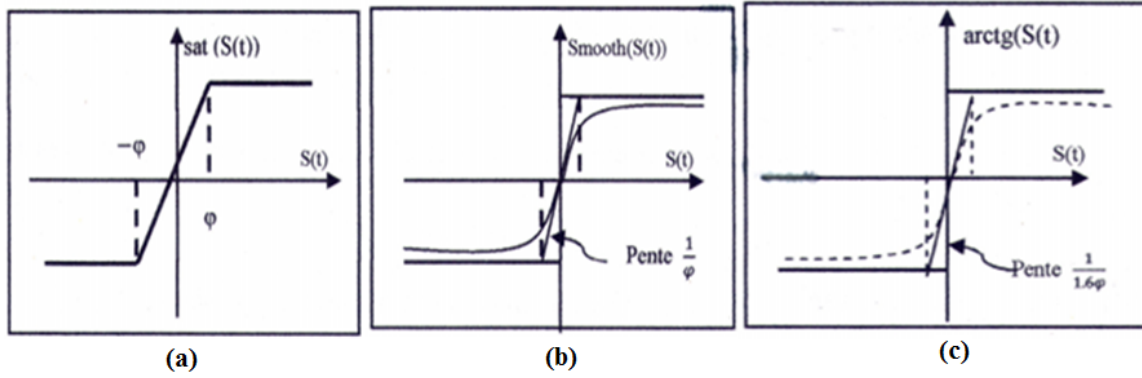


FIG. 3.6 : Fonctions de commutation : (a) Saturation, (b) Smooth, (c) Arctangente.

3.4 Théorie de la logique floue

3.4.1 Évolution de la FLC

La logique floue est une approche intelligente inspirée du raisonnement humain, adaptée au traitement des systèmes complexes, non linéaires et imprécis. Introduite par L.A. Zadeh en 1965, elle repose sur la notion de degrés d'appartenance plutôt que sur la logique binaire classique [69]. En 1973, Zadeh proposa son application aux problèmes de commande, puis E.H. Mamdani développa en 1974 le premier contrôleur flou destiné à la commande d'une turbine à vapeur [70]. Par la suite, Sugeno appliqua cette technique au contrôle industriel, contribuant ainsi au développement de la commande floue dans plusieurs domaines [71].

À partir des années 1980, la logique floue connut un essor important dans les applications industrielles et les systèmes embarqués, notamment dans les secteurs des transports, de l'automobile, de l'électroménager et des procédés industriels. Son succès s'explique principalement par sa capacité à gérer les incertitudes, les perturbations et les systèmes difficiles à modéliser mathématiquement. Elle permet également de traduire l'expertise humaine sous forme de règles linguistiques simples de type « Si-Alors ».

La commande floue est particulièrement adaptée aux systèmes complexes, car elle offre une bonne robustesse face aux variations paramétriques et aux perturbations externes, tout en conservant une structure relativement simple et un coût d'implémentation réduit [72].

En robotique, la logique floue permet d'améliorer les performances dynamiques, de réduire les oscillations et d'accroître la robustesse des systèmes. Dans ce chapitre, les principes fondamentaux de la logique floue ainsi que la conception d'un contrôleur flou seront présentés.

3.4.2 Fondements de la théorie des ensembles flous

La logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous, qui permet une modélisation plus flexible des phénomènes naturels à l'aide d'outils mathématiques adaptés. Elle représente une extension de la théorie classique des ensembles booléens.

Dans un ensemble booléen, l'appartenance d'un élément est définie de manière stricte par une fonction caractéristique ne prenant que les valeurs 0 ou 1. En revanche, dans un ensemble flou, la fonction d'appartenance peut prendre toute valeur comprise entre 0 et 1, ce qui permet

de décrire progressivement le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble donné.

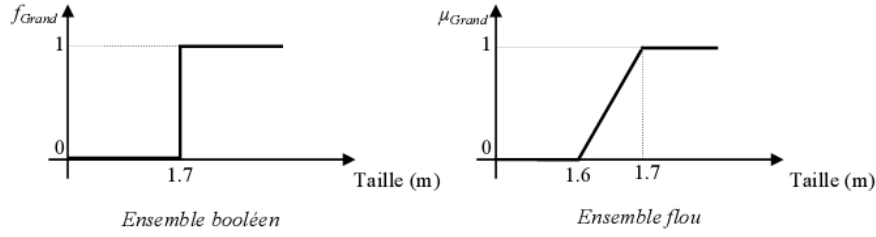


FIG. 3.7 : Ensemble booléen et ensemble flou.

Prenons l'exemple de la variable linguistique « taille », dont l'univers de discours regroupe l'ensemble des tailles possibles d'un individu, et où le terme « grand » représente une valeur linguistique.

Dans la logique classique, une personne mesurant 1,65 m serait strictement considérée comme non « grande ». En revanche, en logique floue, cette même taille peut appartenir à la catégorie « grand » avec un certain degré d'appartenance, traduisant une transition progressive entre les classes.

Cette approche évite les coupures arbitraires des ensembles classiques. Par exemple, il n'est pas cohérent de considérer qu'une personne mesurant 1,70 m est « grande », alors qu'une autre mesurant 1,695 m ne l'est pas. La logique floue introduit ainsi une classification progressive et continue, plus proche du raisonnement humain.

3.4.3 Concepts de base de la logique floue

La logique floue repose sur un ensemble de concepts fondamentaux qui permettent de modéliser l'incertitude et d'imiter le raisonnement humain dans les systèmes complexes. Ces notions constituent la base de la conception des systèmes flous et de leur application en commande et en prise de décision. Pour un sous-ensemble défini sur un univers de discours U :

- Ensemble classique : fonction caractéristique $\chi : U \rightarrow \{0, 1\}$
- Ensemble flou : fonction d'appartenance $\mu : U \rightarrow [0, 1]$

Les principaux concepts de la logique floue sont les suivants.

3.4.3.1 Sous-ensembles flous

Dans un ensemble de référence E , un sous-ensemble flou, défini sur un univers de discours discret ou continu, est représenté par une fonction d'appartenance à valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$, qui indique le degré d'appartenance d'un élément à une classe donnée.

$$\mu_E : U \longrightarrow [0, 1], \quad x \longmapsto \mu_E(x)$$

$$E = \{(x, \mu_E(x)) \mid x \in U\} = \int_U \mu_E(x)/x \quad (\text{cas continu})$$

$$E = \{(x, \mu_E(x)) \mid x \in U\} = \sum_{i=1}^n \mu_E(x_i)/x_i \quad (\text{cas discret})$$

Dans un univers de discours continu ou discret, un sous-ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance permettant de représenter le degré d'appartenance des éléments. Il constitue l'élément de base de la logique floue et sert à modéliser les variables linguistiques en traduisant de manière progressive les notions qualitatives du raisonnement humain.

Un sous-ensemble flou est généralement caractérisé par (voir Figure 3.8) :

- **Le noyau** : ensemble des éléments dont le degré d'appartenance est égal à 1.
- **Le support** : ensemble des éléments dont le degré d'appartenance est strictement positif.
- **La hauteur** : valeur maximale de la fonction d'appartenance.
- **L'ensemble normalisé** : ensemble dont la hauteur est égale à 1.

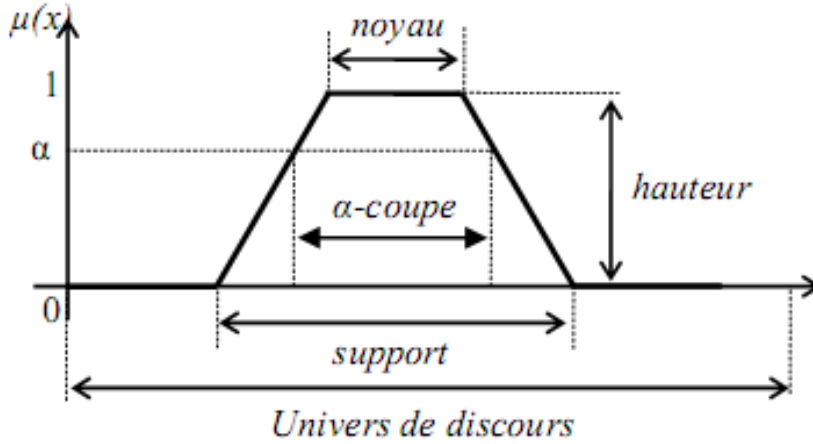


FIG. 3.8 : Caractéristiques essentielles d'un sous-ensemble flou.

Les deux concepts importants des ensembles flous utilisés pour analyser ou simplifier les fonctions d'appartenance sont :

- Coupe de niveau α ou α -coupe.

C'est une façon de transformer un ensemble flou en ensemble classique en gardant uniquement les éléments dont le degré d'appartenance est $\geq \alpha$:

$$E_\alpha = \{x \in U \mid \mu_E(x) \geq \alpha\} \quad (3.16)$$

- Singleton flou.

C'est un ensemble flou très particulier qui représente une seule valeur précise (un seul élément a un degré 1, tous les autres valent 0) :

$$\mu_x(x) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_x(y) = 0, \quad \forall y \neq x \quad (3.17)$$

3.4.3.2 Variables linguistiques

Les variables linguistiques représentent un concept clé de la logique floue. Contrairement aux variables numériques traditionnelles, elles prennent des valeurs sous forme de termes linguistiques ou d'expressions qualitatives, permettant ainsi de modéliser les connaissances humaines de manière approximative. Une variable linguistique est caractérisée par un triplet (V, U, T_V) où :

- V : représente la variable linguistique ;
- U : représente l'univers de discours ;
- T_V : représente l'ensemble des termes linguistiques associés à la variable.

L'univers de discours correspond à l'ensemble des valeurs possibles prises par la variable considérée.

. Exemple

Considérons la variable linguistique « vitesse » dans un système de commande automatique d'un procédé dynamique. Elle permet de représenter le comportement du système de manière qualitative, en utilisant des termes linguistiques proches du raisonnement humain plutôt que des valeurs numériques précises (voir Figure 3.9). Cette variable peut être décrite par le triplet suivant :

$$\{\text{Vitesse}, \mathbb{R}^+, (\text{Lente}, \text{Moyenne}, \text{Rapide})\}$$

où :

- **Vitesse** : désigne la variable linguistique étudiée ;
- $\mathbb{R}^+$: représente l'univers de discours correspondant à l'ensemble des valeurs réelles positives que peut prendre la vitesse ;
- **(Lente, Moyenne, Rapide)** : correspondent aux termes linguistiques associés à cette variable, définissant les différentes catégories floues de la vitesse.

Les fonctions d'appartenance de la variable linguistique « vitesse » (lente, moyenne, rapide) sont illustrées par la Figure 3.9. Les zones de chevauchement assurent une transition progressive entre les états, permettant à une même valeur d'appartenir à plusieurs ensembles avec des degrés différents. Par exemple, 40 km/h peut appartenir à la fois aux ensembles « lente » et « moyenne ».

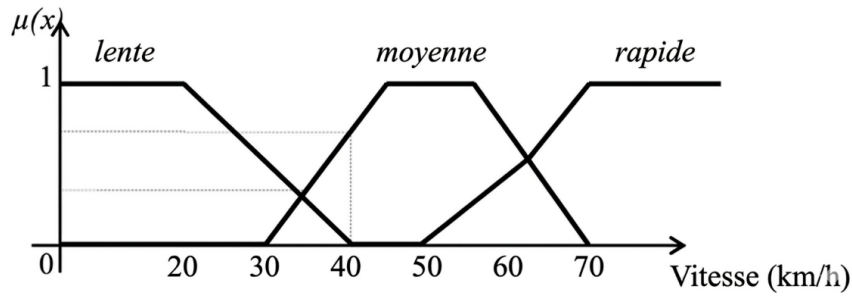


FIG. 3.9 : Fonctions d'appartenance associées à la variable linguistique « vitesse ».

Les sous-ensembles flous permettent de représenter différentes notions, telles que le degré de spécificité et le niveau de précision d'une information. Ces différents cas sont illustrés dans la Figure 3.10.

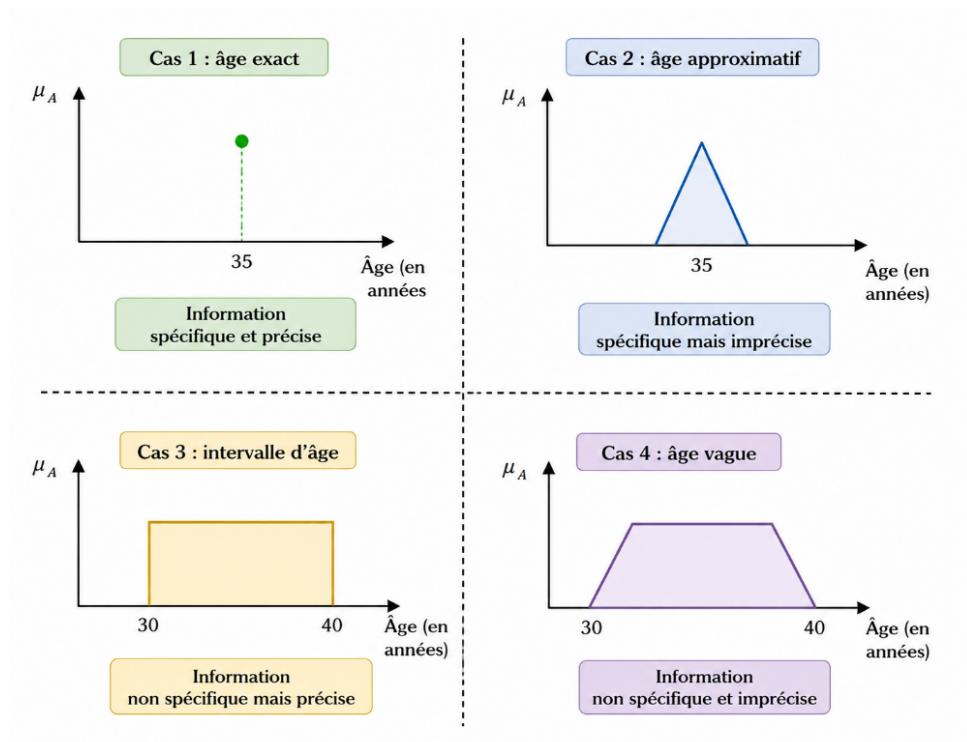


FIG. 3.10 : Spécificité et précision à travers les sous-ensembles flous.

3.4.3.3 Opérations sur les ensembles flous

Les ensembles flous généralisent les opérations de la logique booléenne classique en introduisant la notion de degré d'appartenance compris entre 0 et 1. Ainsi, les opérations fondamentales telles que l'intersection, l'union et la complémentation sont adaptées au cadre flou afin de mieux représenter les incertitudes et les imprécisions des systèmes réels.

Soient A et B deux ensembles flous définis sur un univers de discours E . La relation floue R entre ces ensembles est définie par :

$$R : A \times B \longrightarrow [0, 1], \quad (x, y) \longmapsto \mu_R(x, y)$$

. L'intersection.

L'opération d'intersection entre deux ensembles flous A et B regroupe les éléments communs aux deux ensembles (voir Figure 3.11). Elle s'exprime par :

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \mu_{\text{AND}}(x, y) = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (3.18)$$

. L'union.

L'opération d'union entre deux ensembles flous A et B correspond à l'ensemble des éléments présents dans A , dans B , ou dans les deux simultanément (voir Figure 3.11). Elle se formule par :

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = \mu_{\text{OR}}(x, y) = \max(\mu_A, \mu_B) \quad (3.19)$$

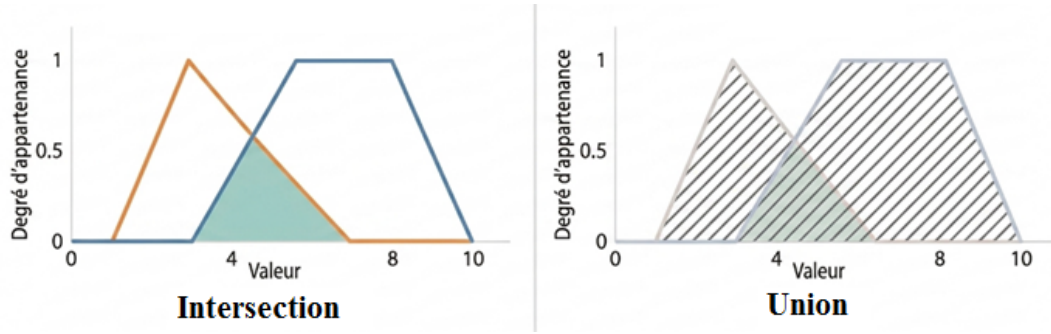


FIG. 3.11 : Représentation graphique de l'intersection et de l'union de deux ensembles flous.

. La complémentation.

Le complément d'un ensemble flou A dans l'univers de référence E exprime le degré selon lequel un élément n'appartient pas à A . Il est défini par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (3.20)$$

3.4.3.4 Fonction d'appartenance

Pour permettre le traitement informatique des variables linguistiques dans les systèmes de décision floue, celles-ci doivent être représentées à l'aide de fonctions d'appartenance. Ainsi, chaque terme linguistique est associé à une fonction notée $\mu_E(x)$ qui définit le degré d'appartenance d'un élément x à l'ensemble flou E .

L'ensemble des éléments tels que $\mu_E(x) > 0$ est appelé le support de l'ensemble flou E . En pratique, plusieurs formes de fonctions d'appartenance sont utilisées, parmi lesquelles les plus courantes sont (voir Figure 3.12) : fonction triangulaire, fonction trapézoïdale, fonction gaussienne et fonction sigmoïdale.

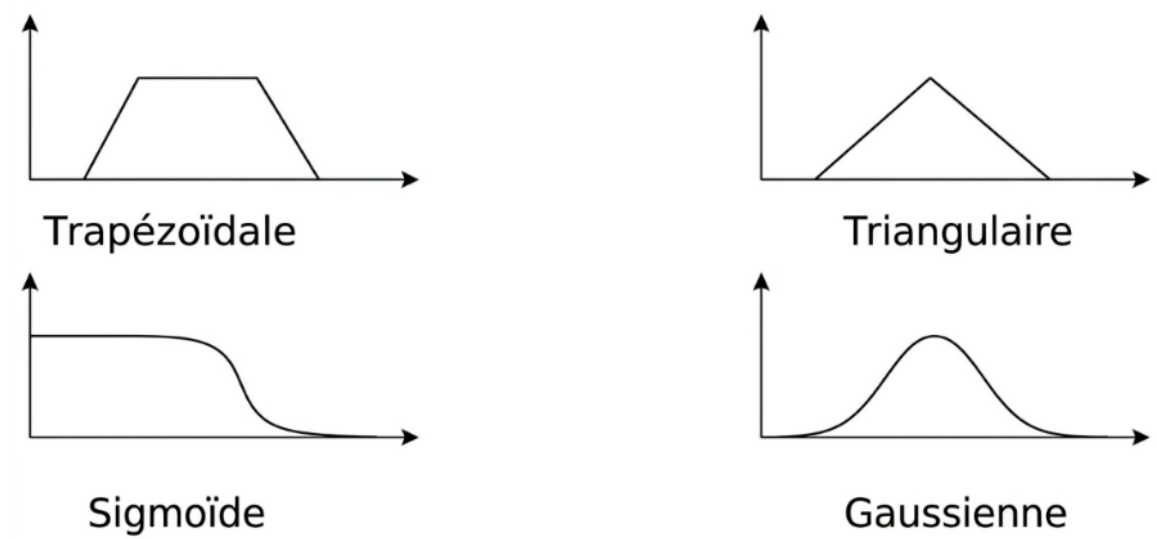


FIG. 3.12 : Principales formes de fonctions d'appartenance utilisées dans les ensembles flous.

3.4.3.5 Propositions et règles floues

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (V, U, T_V) et s'exprime sous la forme « V est E », où E désigne une valeur linguistique appartenant à l'ensemble des termes T_V . Par exemple, l'énoncé « la taille de Paul est moyenne » constitue une proposition floue construite à partir de la variable linguistique correspondante :

$$(\text{taille_de_Paul}, \{\text{tailles}\}, \{\dots, \text{MOYENNE}, \dots\}).$$

La valeur de vérité d'une proposition floue est déterminée par le degré d'appartenance de la valeur réelle V à l'ensemble flou E , exprimée par $\mu_E(v)$.

Une proposition floue complexe peut être formée en reliant plusieurs propositions élémentaires à l'aide d'opérateurs logiques, notamment :

. La conjonction (et).

L'opération de conjonction entre deux propositions floues $(V_1 \text{ est } E_1)$ et $(V_2 \text{ est } E_2)$ peut être définie à l'aide de différentes approches logiques résumées dans le Tableau 3.1.

Logique de Zadeh	$\min(\mu_{E_1}(v_1), \mu_{E_2}(v_2))$
Logique de Lukasiewicz	$\max(\mu_{E_1}(v_1) + \mu_{E_2}(v_2) - 1, 0)$
Logique probabiliste	$\mu_{E_1}(v_1) * \mu_{E_2}(v_2)$

TAB. 3.1 : La conjonction (et) selon différentes approches logiques

. Disjonction (ou).

La disjonction $(V_1 \text{ est } E_1)$ ou $(V_2 \text{ est } E_2)$ est illustrée dans le Tableau 3.2.

Logique de Zadeh	$\max(\mu_{E_1}(v_1), \mu_{E_2}(v_2))$
Logique de Lukasiewicz	$\min(\mu_{E_1}(v_1) + \mu_{E_2}(v_2), 1)$
Logique probabiliste	$\mu_{E_1}(v_1) + \mu_{E_2}(v_2) - \mu_{E_1}(v_1) * \mu_{E_2}(v_2)$

TAB. 3.2 : La disjonction (ou) selon différentes approches logiques

.Implication floue.

L'implication (V_1 est E_1) implique (V_2 est E_2) peut être indiquée dans le Tableau 3.3.

- **Implication floue**

Méthode de Lukasiewicz	$\min(1 - \mu_{E_1}(v_1) + \mu_{E_2}(v_2), 1)$
Méthode de Mamdani	$\min(\mu_{E_1}(v_1), \mu_{E_2}(v_2))$
Méthode de Larsen	$\mu_{E_1}(v_1) * \mu_{E_2}(v_2)$

TAB. 3.3 : L'implication selon différentes approches logiques

. Complémentation (non).

La négation d'une proposition floue : non (V est E) est donnée par :

$$1 - \mu_E(v) \quad (3.21)$$

.Règle floue.

Une règle floue représente un mécanisme de décision basé sur une implication logique entre des prémisses et une conclusion. Elle peut être exprimée sous la forme :

$$V_1 \text{ est } E_1 \text{ et } V_2 \text{ est } E_2 \text{ implique } V_3 \text{ est } E_3 \quad (3.22)$$

ou sous forme linguistique :

$$\textbf{Si } V_1 \text{ est } E_1 \text{ et } V_2 \text{ est } E_2 \textbf{ alors } V_3 \text{ est } E_3 \quad (3.23)$$

Dans cette règle (3.23), la partie « si » constitue la prémisse et la partie « alors » représente la conclusion.

. Activation d'une règle floue.

L'activation d'une règle floue se produit dès que le degré de vérité de sa prémisse est supérieur à zéro. La règle intervient alors dans le processus d'inférence afin de déterminer la conclusion correspondante.

3.4.4 Architecture générale d'un contrôleur flou

Inspirée du raisonnement humain, la commande floue constitue une méthode efficace pour le contrôle des systèmes complexes et incertains. À la différence des approches classiques, elle s'appuie principalement sur des règles linguistiques issues de l'expérience plutôt que sur un modèle mathématique détaillé du système. De manière générale, un contrôleur flou est constitué de quatre éléments principaux comme l'illustre la Figure 3.13.

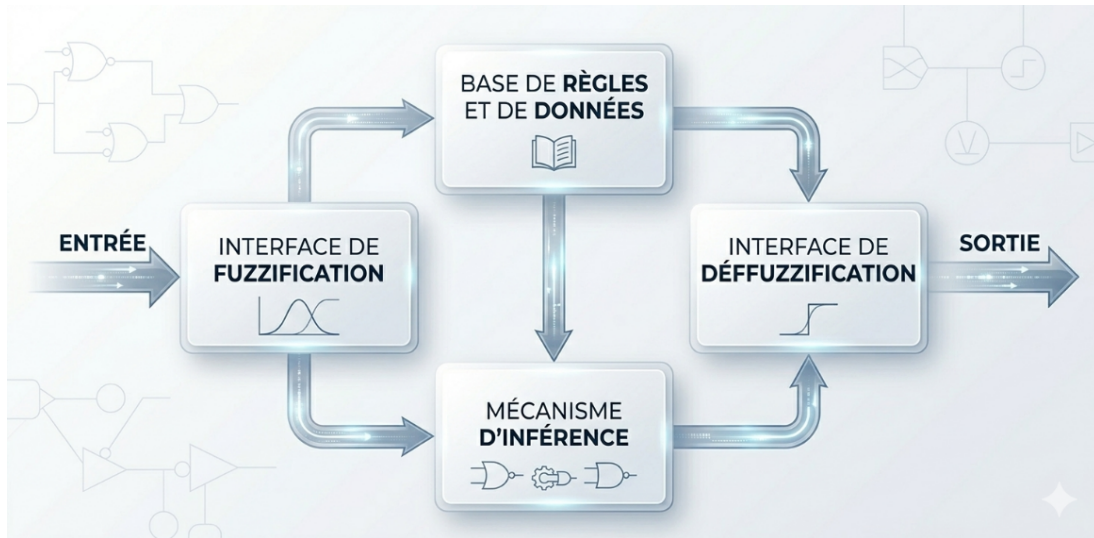


FIG. 3.13 : Structure générale d'un contrôleur flou.

3.4.4.1 Interface de fuzzification

L'interface de fuzzification constitue la première étape du contrôleur flou. Elle convertit les valeurs numériques mesurées par les capteurs en variables linguistiques exploitables par le système flou. Cette opération permet d'évaluer le degré d'appartenance de chaque valeur d'entrée aux différents sous-ensembles flous définis par les fonctions d'appartenance. Afin de faciliter les traitements numériques et d'améliorer les performances du contrôleur, les variables physiques sont généralement normalisées dans l'intervalle $[-1, 1]$.

3.4.4.2 Base de règles du contrôleur flou

La base de règles constitue l'élément central du contrôleur flou. Elle regroupe les connaissances nécessaires à la prise de décision en reliant les variables floues d'entrée et de sortie à l'aide de règles d'inférence généralement formulées sous la forme suivante :

Si condition 1 et/ou condition 2 (et/ou ...), **Alors** action sur les sorties.

La conception des règles repose sur la connaissance du système et l'expertise de l'opérateur, qui définit les variables linguistiques ainsi que les ensembles et fonctions d'appartenance. Les performances du contrôleur dépendent directement de la pertinence de ces règles et du choix des fonctions d'appartenance.

Le processus d'inférence applique les règles aux variables d'entrée (erreur e et sa variation Δe) pour générer l'action de commande. Ces règles peuvent être représentées sous forme lin-

guistique, symbolique ou sous forme de table d'inférence regroupant toutes les combinaisons possibles entre entrées et sortie.

Les principales règles d'inférence utilisées sont les suivantes :

- Si e est GN et Δe est GN alors Δu est GN.
- Si e est GN et Δe est Z alors Δu est MN.
- Si e est GN et Δe est GP alors Δu est Z.
- Si e est Z et Δe est GN alors Δu est MN.
- Si e est Z et Δe est Z alors Δu est Z.
- Si e est Z et Δe est GP alors Δu est MP.
- Si e est GP et Δe est GN alors Δu est Z.
- Si e est GP et Δe est Z alors Δu est MP.
- Si e est GP et Δe est GP alors Δu est GP.

Ces règles peuvent être représentées par la matrice d'inférence donnée par le Tableau 3.4.

TAB. 3.4 : Matrice d'inférence des règles floues.

$e / \Delta e$	GN	Z	GP
GN	GN	MN	Z
Z	MN	Z	MP
GP	Z	MP	GP

Avec : les symboles GN, MN, Z, MP et GP désignent des termes linguistiques flous représentant respectivement des niveaux Grand Négatif, Moyen Négatif, Zéro, Moyen Positif et Grand Positif. Ils sont utilisés pour décrire les valeurs de l'erreur e , de sa variation Δe et de la commande Δu dans les règles d'inférence floue.

Ces règles permettent de déterminer l'action de commande Δu appropriée en fonction de l'évolution de l'erreur e et de sa variation Δe .

3.4.4.3 Mécanisme d'inférence

Le mécanisme d'inférence constitue l'étape au cours de laquelle le contrôleur flou interprète les variables linguistiques et applique les règles d'inférence afin de déterminer la sortie du système.

Les variables d'entrée et de sortie sont mises en relation par des règles floues utilisant des opérateurs logiques tels que « ET », « OU » et « ALORS ». La conclusion de chaque règle est obtenue grâce aux fonctions d'implication et aux opérateurs de composition floue.

Les méthodes d'inférence se distinguent principalement par la façon dont ces opérateurs logiques sont pris en compte dans les règles floues. Parmi les plus utilisées, on peut citer :

. Méthode d'inférence Max-Min.

Dans cette méthode :

- L'opérateur « ET » est représenté par la fonction minimum.
- L'opérateur « OU » est représenté par la fonction maximum.
- La conclusion « ALORS » est également représentée par la fonction maximum.

Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes d'inférence floue grâce à sa simplicité et son efficacité. Sa représentation graphique est illustrée par la Figure 3.14.

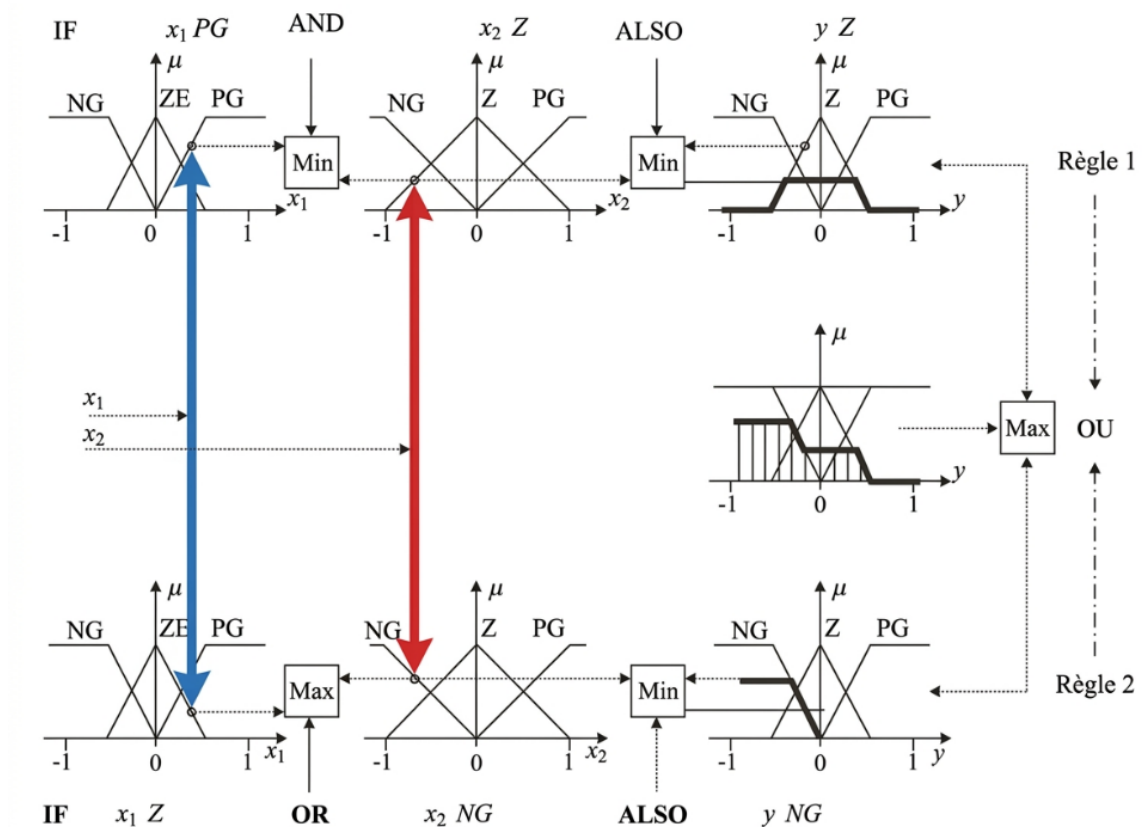


FIG. 3.14 : Méthode d'inférence Max-Min.

. Méthode d'inférence Max-Produit.

La méthode Max-Produit utilise :

- La fonction minimum pour représenter l'opérateur « ET ».
- La fonction maximum pour représenter l'opérateur « OU ».
- La fonction produit pour représenter la conclusion « ALORS ».

Cette approche permet d'obtenir des résultats plus progressifs dans certains systèmes flous. La représentation graphique de cette méthode est donnée par la Figure 3.15.

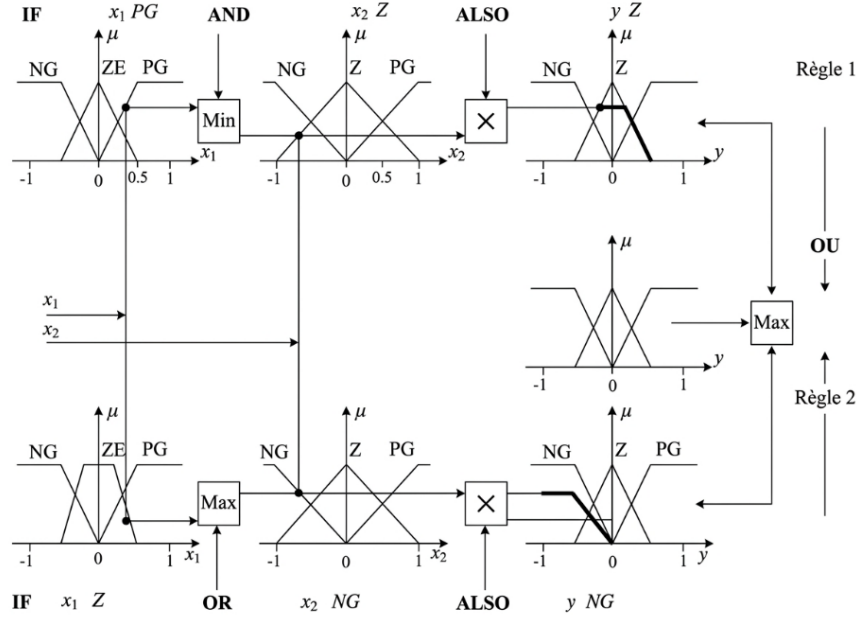


FIG. 3.15 : Méthode d'inférence Max-Produit.

.Méthode d'inférence Somme-Produit.

Dans cette méthode :

- L'opérateur « ET » est représenté par la fonction produit.
- L'opérateur « OU » est représenté par la fonction somme.
- La conclusion « ALORS » est représentée par la fonction produit.

Cette méthode permet de prendre en compte l'influence cumulative des différentes règles actives dans le système flou. Sa représentation graphique est illustrée par la Figure 3.16.

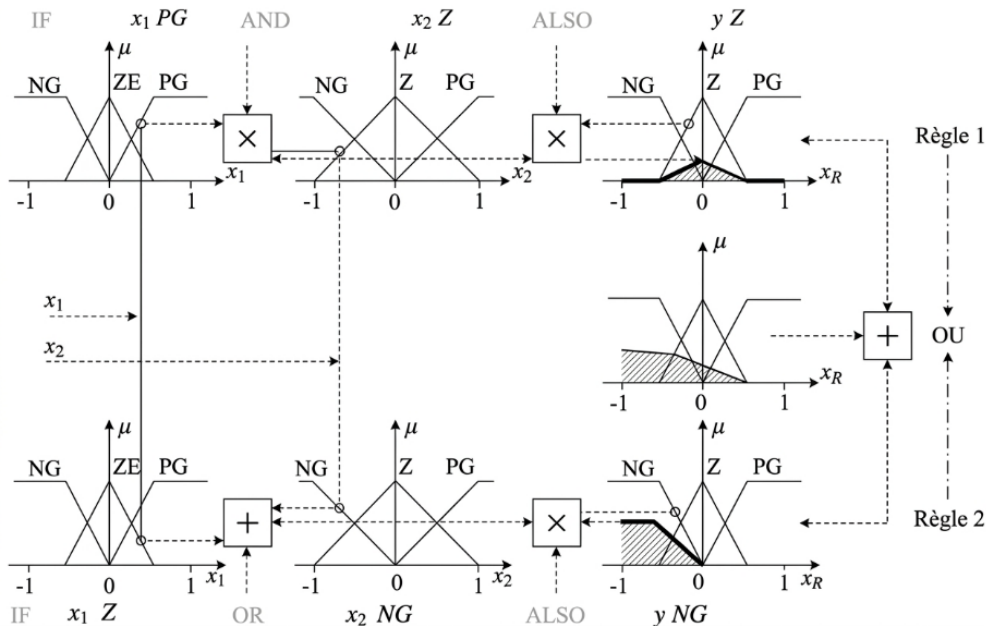


FIG. 3.16 : Méthode d'inférence Somme-Produit.

3.4.4.4 Interface de défuzzification

Les mécanismes d'inférence génèrent généralement une sortie sous forme floue. Afin de l'exploiter dans un système réel, il est nécessaire de la transformer en une valeur numérique précise : cette étape est appelée défuzzification. Elle consiste à déterminer une valeur unique à partir des degrés d'appartenance associés aux différents sous-ensembles flous de la variable de sortie.

Plusieurs méthodes de défuzzification existent, notamment la méthode du maximum, la méthode des hauteurs pondérées et la méthode du centre de gravité illustrée par la Figure 3.17. Cette technique est la plus utilisée en raison de sa précision et de sa stabilité, et elle a été retenue dans le cadre de ce travail.

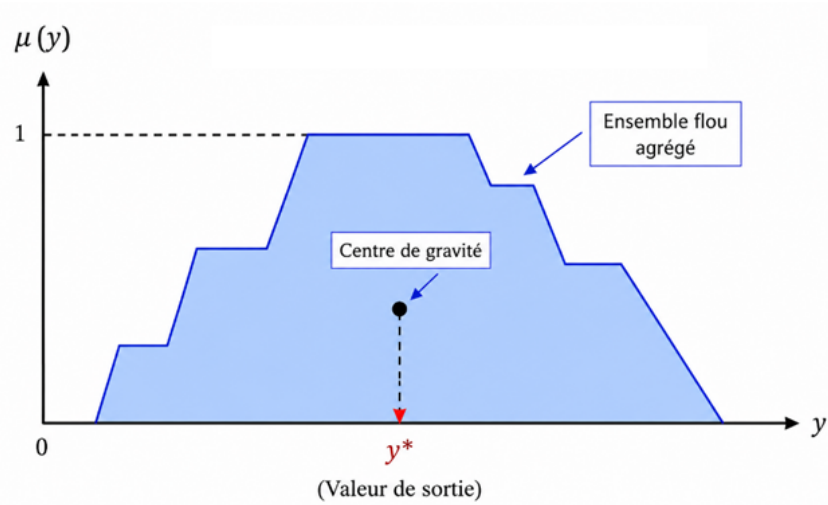


FIG. 3.17 : Défuzzification par la méthode du centre de gravité.

La valeur de sortie obtenue par la méthode du centre de gravité est donnée par l'équation :

$$u = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (3.24)$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes à suivre pour concevoir un contrôleur par mode glissant classique et par logique floue. Ces approches sont particulièrement adaptées aux systèmes non linéaires et permettent d'améliorer les performances du robot en termes de stabilité, de robustesse et de précision.

La commande par mode glissant se distingue par sa forte robustesse face aux perturbations et aux variations paramétriques, tout en garantissant une réponse dynamique rapide. Cependant, elle présente un inconvénient lié au phénomène de chattering, qui peut être atténué en utilisant une approche basée sur la logique floue, inspirée du raisonnement humain.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation des différentes stratégies de commande étudiées, afin d'analyser et de comparer leurs performances dans le pilotage du robot golfeur.

Chapitre 4

Application des commandes robustes au robot golfeur

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'application des stratégies de commande robuste, développées au chapitre 3, au robot golfeur afin d'évaluer les performances de la commande par mode glissant (SMC) et de la commande hybride floue par mode glissant (FSMC) dans le cadre du suivi de trajectoire. Le robot étudié est un système fortement non linéaire, soumis à diverses incertitudes et perturbations telles que le bruit de mesure, les variations paramétriques et le choc d'impact avec la balle. Ces contraintes rendent le problème de commande particulièrement complexe et nécessitent l'utilisation d'approches robustes capables de préserver la stabilité et la précision du système.

Dans ce contexte, les commandes SMC et FSMC sont appliquées au robot golfeur en utilisant les trajectoires de référence développées dans les travaux antérieurs [38], associées à une vitesse désirée du deuxième segment de $v_{2xm} \approx 35$ (m/s). Les performances des deux stratégies sont évaluées à travers des simulations numériques en termes de précision de suivi, de robustesse face aux perturbations et d'incertitudes. Une étude comparative des résultats obtenus permet finalement de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque approche, ainsi que l'apport de l'intégration de la logique floue dans la commande par mode glissant.

4.2 Commande par mode glissant appliquée au robot

4.2.1 Conception de loi de commande SMC

Après avoir établi les principes de la commande par mode glissant au chapitre précédent, nous nous intéressons à l'étude des performances du système commandé en boucle fermée. À partir du modèle dynamique du robot golfeur donné par l'équation (2.22), celui-ci peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Où encore :

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} = M^{-1}(\theta) \cdot \left(\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} - C(\theta, \dot{\theta}) \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - G(\theta) \right) \quad (4.2)$$

La trajectoire de référence du robot est définie de manière similaire à (4.2), ce qui donne :

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{1r} \\ \ddot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} = M_r^{-1}(\theta) \cdot \left(\begin{pmatrix} \tau_{1r} \\ \tau_{2r} \end{pmatrix} - C_r(\theta, \dot{\theta}) \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} \\ \dot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} - G_r(\theta) \right) \quad (4.3)$$

La synthèse de la loi de commande par mode glissant (SMC) appliquée au robot golfeur s'effectue selon les étapes suivantes.

Étape 1 : Définition des erreurs de suivi

On définit le vecteur d'erreur entre les trajectoires réelles (mesurée) et les trajectoires de références des variables articulaires du robot comme suit :

$$e = [e_1, e_2, \dot{e}_1, \dot{e}_2, \ddot{e}_1, \ddot{e}_2]^T \quad (4.4)$$

Ou encore :

$$e = [\theta_1 - \theta_{1r}, \theta_2 - \theta_{2r}, \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1r}, \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2r}, \ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_{1r}, \ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_{2r}]^T$$

Le modèle de l'erreur s'écrit alors :

$$\begin{pmatrix} \ddot{e}_1 \\ \ddot{e}_2 \end{pmatrix} = \left(M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} - M_r^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_{1r} \\ \tau_{2r} \end{pmatrix} \right) - \left(M^{-1} C \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - M_r^{-1} C_r \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} \\ \dot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} \right) - (M^{-1} G - M_r^{-1} G_r) \quad (4.5)$$

Étape 2 : Définition de la surface de glissement

L'objectif est de synthétiser une loi de commande assurant la convergence des états du système vers une surface de glissement prédéfinie. On considère les surfaces suivantes :

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 e_1 + \dot{e}_1 \\ k_2 e_2 + \dot{e}_2 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Avec : k_1 et k_2 ce sont des gains positifs qui doivent être judicieusement sélectionnés.

La dérivée temporelle des surfaces est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1 \\ k_2 \dot{e}_2 + \ddot{e}_2 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

En substituant l'expression (4.5) dans (4.7), on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \dot{e}_1 \\ k_2 \dot{e}_2 \end{pmatrix} + \left(M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \end{pmatrix} - M_r^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_{11r} \\ \tau_{22r} \end{pmatrix} \right) - \left(M^{-1} \cdot C \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - M_r^{-1} \cdot C_r \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} \\ \dot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} \right) \quad (4.8)$$

Étape 3 : Détermination de la commande équivalente τ_{eq}

Le calcul des commandes équivalentes τ_{1eq} et τ_{2eq} permet de caractériser le régime de glissement en assurant la convergence de l'état du système vers la surface de glissement définie par $\dot{S}_{1,2} = 0$. Cela donne l'équation (4.9).

$$\begin{pmatrix} \tau_{1eq} \\ \tau_{2eq} \end{pmatrix} = -M \cdot \begin{pmatrix} k_1 \dot{e}_1 \\ k_2 \dot{e}_2 \end{pmatrix} + MM_r^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_{1r} \\ \tau_{2r} \end{pmatrix} + C \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - MM_r^{-1} C_r \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} \\ \dot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} + G - MM_r^{-1} G_r \quad (4.9)$$

Étape 4 : Détermination de la commande robuste τ_c

Pour garantir l'atteinte de la surface de glissement, on ajoute un terme discontinu qui représente la commande robuste :

$$\begin{pmatrix} \tau_{1c} \\ \tau_{2c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -U_{01} \operatorname{sgn}(S_1) \\ -U_{02} \operatorname{sgn}(S_2) \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Ces commandes garantissent la robustesse mais génèrent un phénomène de commutation rapide appelé *chattering*, causé par la fonction signe, particulièrement problématique pour les systèmes mécaniques tels que le robot golfeur.

Étape 5 : Détermination de la commande globale τ

La commande globale est alors définie par :

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{1eq} + \tau_{1c} \\ \tau_{2eq} + \tau_{2c} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

En remplaçant (4.9) et (4.10) dans l'expression de (4.8), on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} \tau_{1c} \\ \tau_{2c} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Et la condition d'attractivité donnée par (3.2) qui exprime la condition de convergence vers la surface de glissement est donnée par :

$$\begin{pmatrix} S_1 \cdot \dot{S}_1 \\ S_2 \cdot \dot{S}_2 \end{pmatrix} < 0 \implies \begin{pmatrix} M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \cdot \tau_{1c} \\ S_2 \cdot \tau_{2c} \end{pmatrix} \end{pmatrix} < 0 \quad (4.13)$$

Afin de satisfaire la condition (4.13), le signe de $\begin{pmatrix} \tau_{1c} \\ \tau_{2c} \end{pmatrix}$ doit être opposé à celui de $M^{-1} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix}$.

On adopte alors pour l'expression (4.10), avec U_{01} et U_{02} sont des gains positifs.

La loi de commande globale est obtenue donc en substituant (4.9) et (4.10) dans (4.11).

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = -M \begin{pmatrix} k_1 \dot{e}_1 \\ k_2 \dot{e}_2 \end{pmatrix} + MM_r^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_{1r} \\ \tau_{2r} \end{pmatrix} + C \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - MM_r^{-1} C_r \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} \\ \dot{\theta}_{2r} \end{pmatrix} + G - MM_r^{-1} G_r - \begin{pmatrix} U_{01} \operatorname{sgn}(S_1) \\ U_{02} \operatorname{sgn}(S_2) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

La Figure (4.1) présente le schéma-bloc de la commande par mode glissant (SMC) appliquée au robot golfeur. Les lois de commande mises en œuvre sont définies par l'équation (4.14).

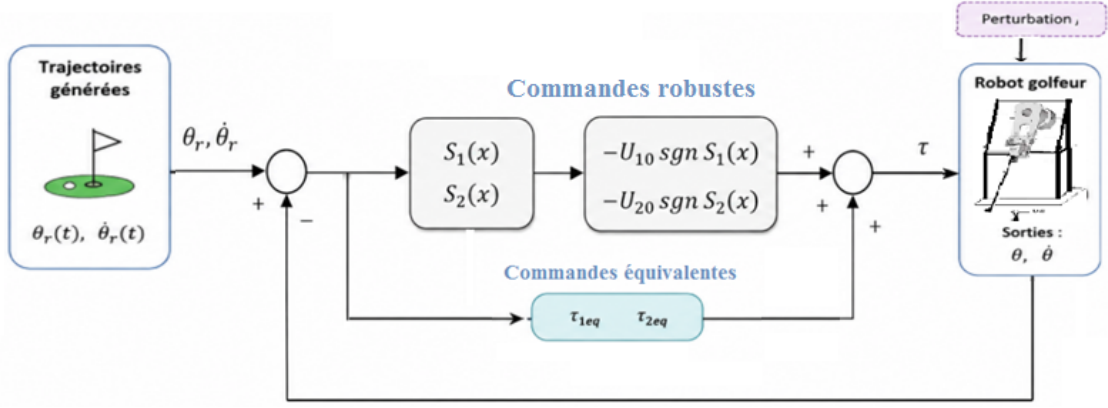


FIG. 4.1 : Schéma fonctionnel de la commande SMC appliquée au robot golfeur.

4.3 Commande mode glissant flou (FSMC) appliquée au robot

La commande par mode glissant flou (FSMC) constitue une extension de la commande par mode glissant classique visant à réduire ses principaux inconvénients tout en conservant ses propriétés de robustesse. Le principe consiste à remplacer le terme discontinu de commutation τ_c , traditionnellement basé sur la fonction signe (équation (4.10)), par un contrôleur flou (interférence floue) capable de générer une action corrective continue en fonction de l'état du système. Dans la commande SMC classique, le terme de commutation τ_c assure l'attractivité et le maintien de la trajectoire sur la surface de glissement, mais il induit également un phénomène de broutement (*chattering*) dû aux commutations à haute fréquence de la commande. Ce phénomène est particulièrement critique pour les systèmes mécaniques, notamment le robot golfeur, puisqu'il peut engendrer des oscillations indésirables, accroître les efforts appliqués aux actionneurs et réduire la précision du suivi. L'utilisation de la logique floue permet alors d'adoucir l'action de commande autour de la surface de glissement, réduisant ainsi le *chattering* tout en préservant la robustesse et les performances de convergence du contrôleur.

4.3.1 Conception de l'interférence floue (FLC)

Selon le principe de la commande par mode glissant, le terme discontinu de commutation τ_c oriente la dynamique du système de manière à ramener les trajectoires vers la surface de glissement $S = 0$. Ainsi, lorsque S est négative, la commande agit dans le sens positif, et inversement lorsque S est positive. Sur cette base, le terme discontinu $(-U_0 \operatorname{sgn}(S))$ est remplacé par un système d'inférence floue (FLC) établissant une relation continue entre la surface de glissement S_i et la commande corrective τ_{1f} . Chaque contrôleur flou génère alors indépendamment une action corrective associée à son articulation, permettant de réduire significativement le phénomène de broutement (*chattering*) tout en préservant la robustesse et les propriétés de convergence de la commande par mode glissant, ainsi la commande robuste devient :

$$\tau_c = \begin{pmatrix} \tau_{1f} \\ \tau_{2f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{FLC}_1(S_1) \\ \text{FLC}_2(S_2) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Ce système d'inférence floue (FLC) qui remplace le terme discontinu ($-U_0 \text{sgn}(S)$) sera développé selon les étapes suivantes :

Étape 1 : Définition des variables linguistiques

La première étape consiste à définir les variables d'entrée et de sortie des deux contrôleurs flous FLC_1 et FLC_2 .

- **Contrôleur flou 1 : FLC_1**

Variable d'entrée : est la surface de glissement de la première articulation donnée par :

$$S_1 = k_1 e_1 + \dot{e}_1$$

Variable de sortie : est la commande corrective : τ_{1f}

- **Contrôleur flou 2 : FLC_2**

Variable d'entrée : est la surface de glissement de la deuxième articulation :

$$S_2 = k_2 e_2 + \dot{e}_2$$

Variable de sortie : Commande corrective τ_{2f}

Étape 2 : Fuzzification des entrées

La fuzzification consiste à convertir les valeurs numériques des surfaces de glissement S_1 et S_2 en variables linguistiques. Cette opération permet de prendre en compte les incertitudes ; de réduire la sensibilité au bruit de mesure ; d'obtenir une transition progressive entre les différentes régions de fonctionnement.

Les variables d'entrée sont décrites par cinq ensembles flous : {NB, NS, ZE, PS, PB}.

avec : NB : Négatif Grand ; NS : Négatif Petit ; ZE : Zéro ; PS : Positif Petit ; PB : Positif Grand.

Les fonctions d'appartenance des entrées de FLC_1 et FLC_2 , illustrées par la Figure (4.2), sont choisies triangulaires et symétriques afin de garantir une transition douce entre les régions floues.

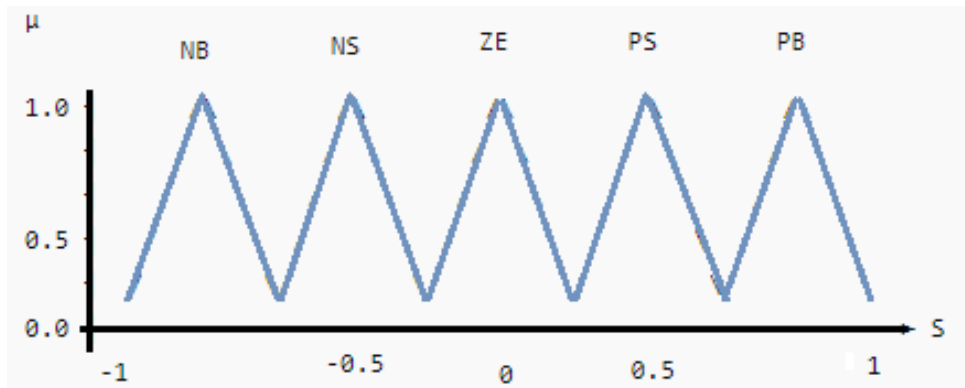


FIG. 4.2 : Fonctions d'appartenance des entrées S_1 et S_2 .

Étape 3 : Fuzzification de la sortie

La sortie τ_f est également décrite par cinq ensembles linguistiques : {NB, NS, ZE, PS, PB}. Cette représentation permet de remplacer la fonction discontinue $\text{Sign}(S)$ par une action de commande continue.

Les fonctions triangulaires sont également choisies symétriques afin d'assurer une variation progressive de la commande.

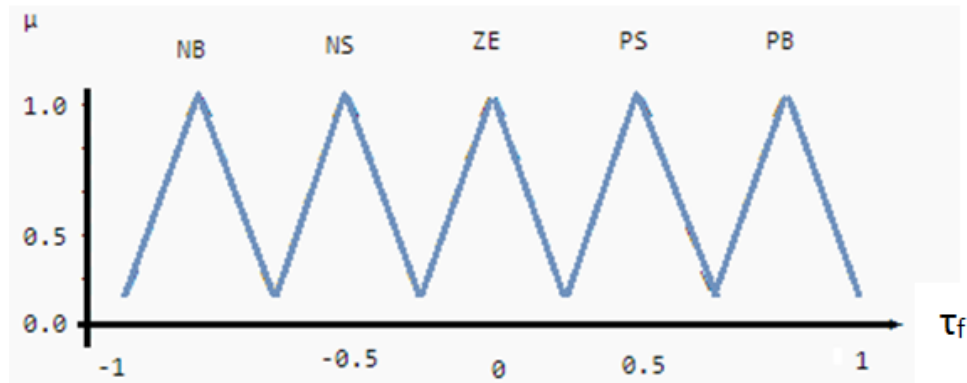


FIG. 4.3 : Fonctions d'appartenance de la sortie τ_f .

Ensemble	Action de commande
NB	Forte commande négative
NS	Faible commande négative
ZE	Commande nulle (trop faible)
PS	Faible commande positive
PB	Forte commande positive

TAB. 4.1 : Fonctions d'appartenance de sortie

Étape 4 : Construction de la base de règles floues

La base de règles constitue le cœur du contrôleur flou.

Les règles sont établies à partir du comportement souhaité de la commande par mode glissant :

- lorsque S est fortement négatif, la commande doit être fortement positive ;
- lorsque S est proche de zéro, la commande doit être faible ;
- lorsque S est fortement positif, la commande doit être fortement négative.

La base de règles peut être définie comme suit.

Surface S	NB	NS	ZE	PS	PB
τ_f	PB	PS	ZE	NS	NB

TAB. 4.2 : Base de règles du contrôleur flou

Les règles linguistiques associées sont :

R1 : Si S est NB alors τ_f est PB.

R2 : Si S est NS alors τ_f est PS.

R3 : Si S est ZE alors τ_f est ZE.

R4 : Si S est PS alors τ_f est NS.

R5 : Si S est PB alors τ_f est NB.

Cette structure reproduit exactement l'action corrective de la fonction $\text{sign}(S)$.

Étape 5 : Inférence floue

L'étape d'inférence détermine quelles règles sont activées pour une valeur donnée de la surface de glissement.

La méthode d'inférence de **Mamdani** est retenue en raison de :

- sa simplicité ;
- son interprétation intuitive ;
- sa large utilisation dans les applications de commande.

Le degré d'activation de chaque règle est calculé à partir des degrés d'appartenance obtenus lors de la fuzzification.

Étape 6 : Défuzzification

La défuzzification transforme la sortie floue obtenue après l'inférence en une valeur numérique directement exploitable par le système de commande.

La méthode du centre de gravité (Center of Gravity – COG) est généralement utilisée :

$$\tau_c = \frac{\int \mu_\tau(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_\tau(z) \, dz}$$

où :

- $\mu_\tau(z)$ représente la fonction d'appartenance agrégée ;
- τ_c est la commande finale appliquée au système.

Cette méthode produit une commande continue et évite les variations brusques.

Étape 7 : Intégration dans la commande par mode glissant

La commande finale du robot golfeur s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{1eq} + \tau_{1f} \\ \tau_{2eq} + \tau_{2f} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Le contrôleur flou remplace ainsi la fonction de commutation discontinue de la commande par mode glissant classique, ce qui permet de réduire significativement le phénomène de *chattering* tout en conservant la robustesse et les propriétés de stabilité de la commande.

La Figure (4.4) présente le schéma-bloc de la commande par mode glissant flou (FSMC) appliquée au robot golfeur. Les lois de commande mises en œuvre sont définies par (4.16).

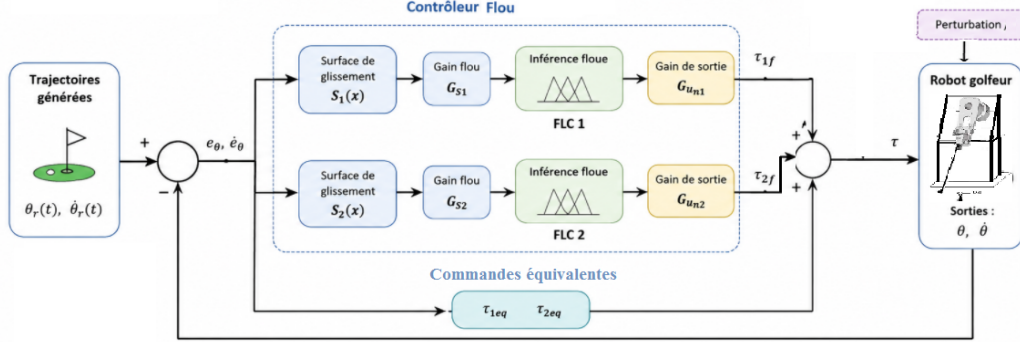


FIG. 4.4 : Schéma fonctionnel de la commande FSMC appliquée au robot golfeur.

4.4 Simulations et interprétation des résultats

Afin d'évaluer de manière rigoureuse les performances des différentes stratégies de commande développées dans ce chapitre, des simulations numériques ont été effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink, en s'appuyant sur les paramètres dynamiques et géométriques du robot golfeur, tels que récapitulés dans le Tableau (4.3). Par ailleurs, le Tableau (4.4) présente les caractéristiques des actionneurs associés aux deux articulations, à savoir le DD moteur 1 et le DD moteur 2 [38].

Les trajectoires de référence retenues correspondent aux trajectoires optimales des positions articulaires et des vitesses angulaires, obtenues à l'issue d'une procédure d'optimisation du mouvement réalisée dans un travail antérieur [38]. Ces trajectoires constituent les consignes de suivi de référence, utilisées comme base de comparaison pour l'évaluation des performances des différentes lois de commande étudiées.

Paramètre	Valeur numérique	Unité	Définition
m_1	4.5	Kg	Masse du premier segment (bras)
m_2	1.24	Kg	Masse du deuxième segment (club+Grip)
l_1	0.4	m	Longueur du premier segment
l_2	0.95	m	Longueur du deuxième segment
lg_1	0.1333	m	Distance entre l'articulation 1 et le centre de gravité du segment 1
lg_2	0.3167	m	Distance entre l'articulation 2 et le centre de gravité du segment 2
I_1	1.27	kg·m ²	Moment d'inertie du premier segment
I_2	3.3×10^{-3}	kg·m ²	Moment d'inertie du deuxième segment
α	60	deg(°)	Angle d'inclinaison
g	9.81	m·s ⁻²	Accélération de la pesanteur

TAB. 4.3 : Paramètres physiques du robot golfeur

Paramètre	Valeur numérique	Unité	Définition
$\tau_{1,max}$	110	N·m	Couple maximal de l'actionneur 1
$\tau_{2,max}$	11	N·m	Couple maximal de l'actionneur 2
$n_{1,max}$	43	tr/min	Vitesse maximale de rotation de l'actionneur 1
$n_{2,max}$	5	tr/min	Vitesse maximale de rotation de l'actionneur 2
M_1	32	Kg	Masse de l'actionneur 1
M_2	1.6	Kg	Masse de l'actionneur 2

TAB. 4.4 : Paramètres des actionneurs

4.4.1 Perturbations et incertitudes

Afin d'évaluer la robustesse des stratégies de commande SMC et FSMC, différentes sources de perturbations et d'incertitudes ont été introduites dans les simulations. Ces perturbations visent à reproduire des conditions de fonctionnement réalistes et à analyser la capacité des contrôleurs à maintenir leurs performances en présence d'effets indésirables.

4.4.1.1 Bruits de mesure sur les positions et les vitesses articulaires

Les bruits de mesure considérés sont ajoutés aux signaux des positions et des vitesses articulaires du robot, comme illustré à la Figure (4.5). Ces perturbations sont de nature aléatoire

et simulent les erreurs de mesure susceptibles d'être générées par les capteurs embarqués.

Le bruit affectant les positions articulaires varie dans l'intervalle $[-0,1 ; 0,1]$ rad, tandis que celui appliqué aux vitesses articulaires évolue entre $-0,75$ et $0,75$ rad/s. L'introduction de ces bruits permet d'évaluer la sensibilité des lois de commande aux imperfections de mesure et de vérifier leur aptitude à assurer un suivi précis des trajectoires de référence malgré ce genre de perturbations.

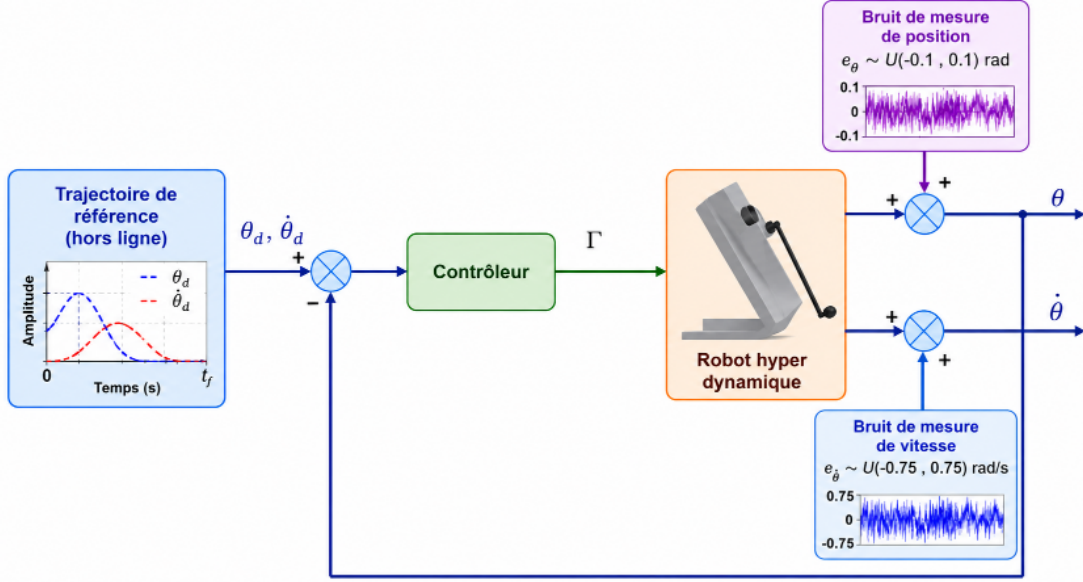


FIG. 4.5 : Contrôle du robot golfeur en présence du bruit de mesure.

4.4.1.2 Perturbation extérieure : choc d'impact

Afin d'évaluer la robustesse des contrôleurs face aux perturbations externes, un choc d'impact simulant la frappe de la balle est introduit dans les simulations. Comme illustré à la Figure (4.6), cette perturbation intervient à l'instant d'impact ($t_m = 0,9$ s) et se traduit par des couples perturbateurs agissant sur les deux articulations du robot. Le choc est modélisé par une impulsion de durée égale à 20 ms, d'amplitude $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ pour la première articulation et $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ pour la seconde. Ces perturbations sont soustraites aux couples de commande afin de reproduire les effets dynamiques du contact avec la balle.

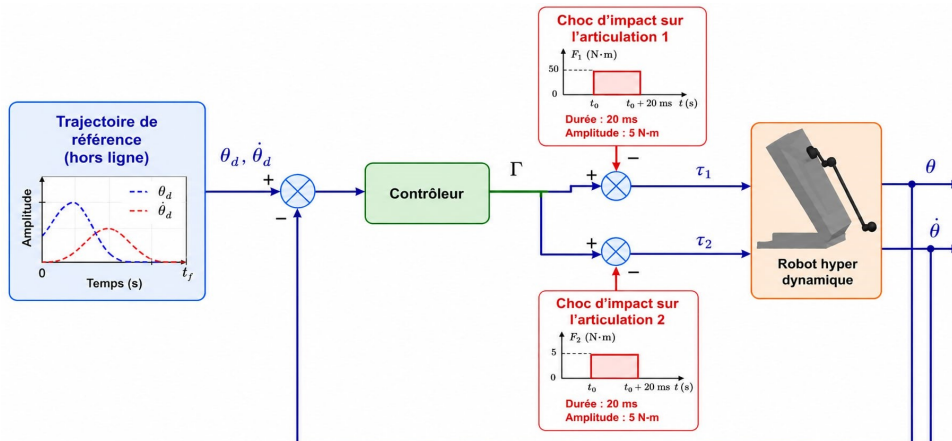


FIG. 4.6 : Contrôle du robot golfeur en présence du choc d'impact.

4.4.1.3 Incertitudes paramétriques

Des incertitudes paramétriques sont introduites pour évaluer la robustesse du contrôleur face aux variations du modèle dynamique du robot. Elles concernent principalement le changement de l'inertie du club (I_2), modélisé par une variation de 50% par rapport à sa valeur nominale. Cette modification représente un changement possible du club utilisé, et donc de sa masse ou de sa distribution inertielle.

4.4.2 Simulation du contrôleur SMC et analyse des performances

Nous allons désormais appliquer au robot golfeur la commande robuste par modes glissants, développée précédemment et donnée par le schéma bloc (4.1), en présence de différentes perturbations externes et incertitudes paramétriques.

4.4.2.1 Sensibilité au bruit de mesure

Dans cette section, nous analysons la sensibilité de la loi de commande par modes glissants appliquée au robot golfeur en présence de bruit de mesure appliqué seulement sur les positions angulaires (voir Figure (4.5)).

Les résultats de simulation correspondants sont présentés dans les Figures (4.7), (4.8), (4.9) et (4.10), permettant d'évaluer les performances du système.

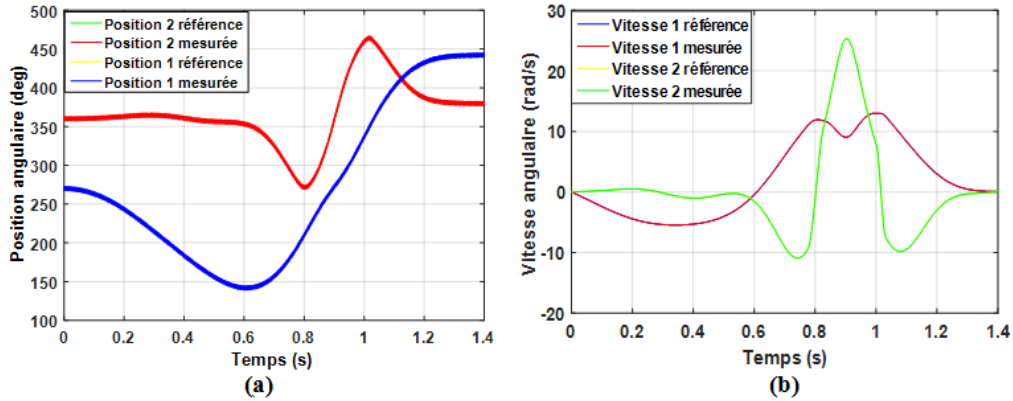


FIG. 4.7 : Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec bruit de mesure).

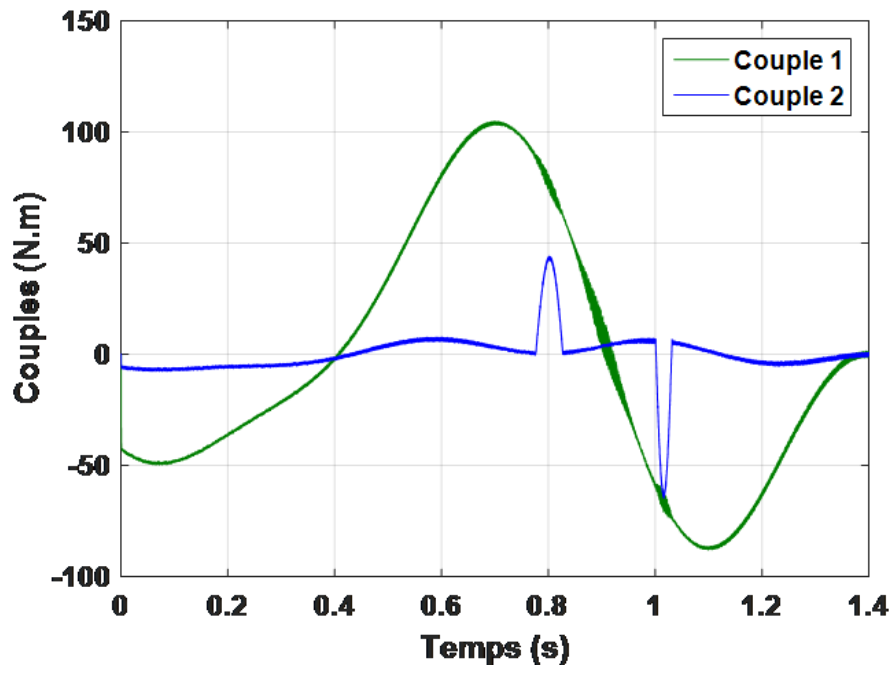


FIG. 4.8 : Commandes SMC avec bruit de mesure.

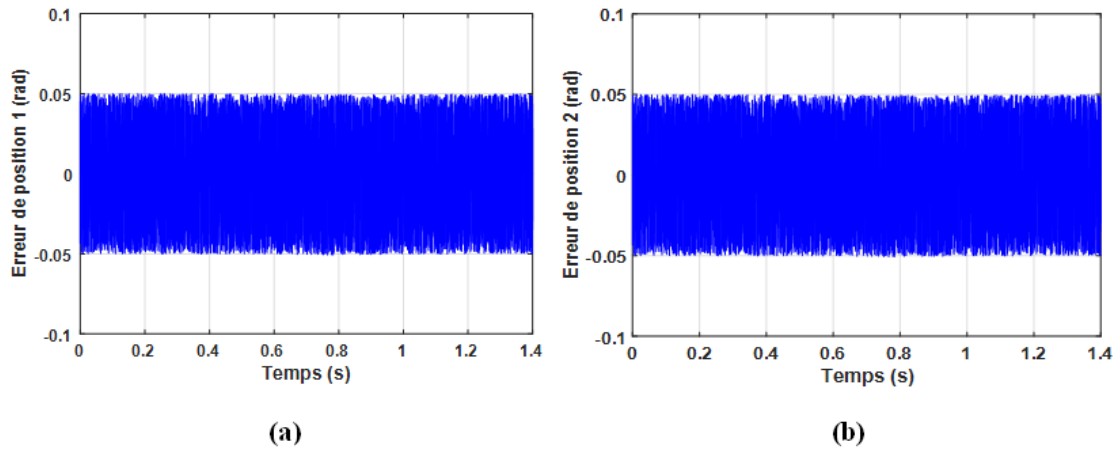


FIG. 4.9 : Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec bruit de mesure).

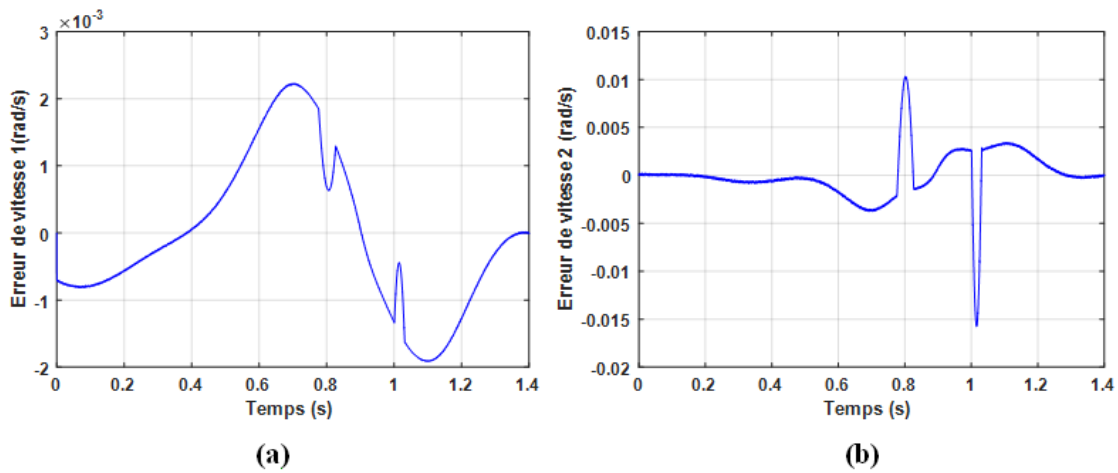


FIG. 4.10 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec bruit de mesure).

Synthèse 1

Les Figures (4.7a) et (4.7b) montrent une bonne performance de poursuite des positions et des vitesses angulaires par rapport à leurs trajectoires de référence. Ce résultat est confirmé par les Figures (4.9) et (4.10), qui illustrent les erreurs de suivi des variables articulaires, lesquelles restent faibles malgré la présence de perturbations.

On observe également, à travers les Figures (4.7a) et (4.9), que les positions angulaires ainsi que leurs signaux d'erreur présentent des fluctuations dues au bruit de mesure. En revanche, ce phénomène est moins prononcé au niveau des vitesses angulaires et de leurs erreurs de poursuite, comme le montrent les Figures (4.7b) et (4.10).

Par ailleurs, la Figure (4.10) indique que les couples moteurs respectent les limites physiques des actionneurs, telles que définies dans le Tableau (4.4). On note toutefois la présence de légères oscillations dues au bruit de mesure ainsi qu'au phénomène de *chattering* lié à la fonction signe de la commande robuste SMC, sans pour autant compromettre la stabilité globale du système ni ses performances de suivi.

4.4.2.2 Sensibilité au choc d'impact

Dans cette section, nous étudions la sensibilité de la loi de commande par modes glissants appliquée au robot golfeur en présence de perturbations extérieures sous forme de choc d'impact (voir Figure (4.6)).

Les résultats de simulation associés sont illustrés dans les Figures (4.11), (4.12), (4.13) et (4.14), et permettent d'analyser et d'évaluer les performances du système de commande proposé.

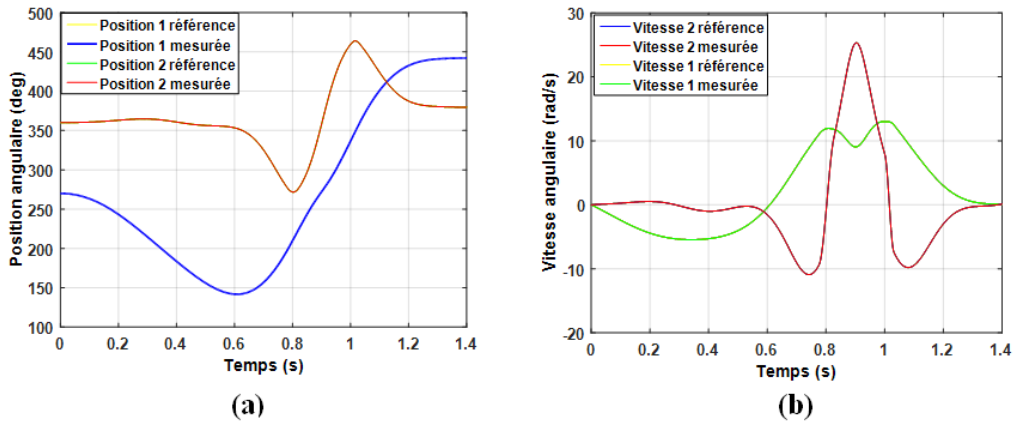


FIG. 4.11 : Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec choc d'impact).

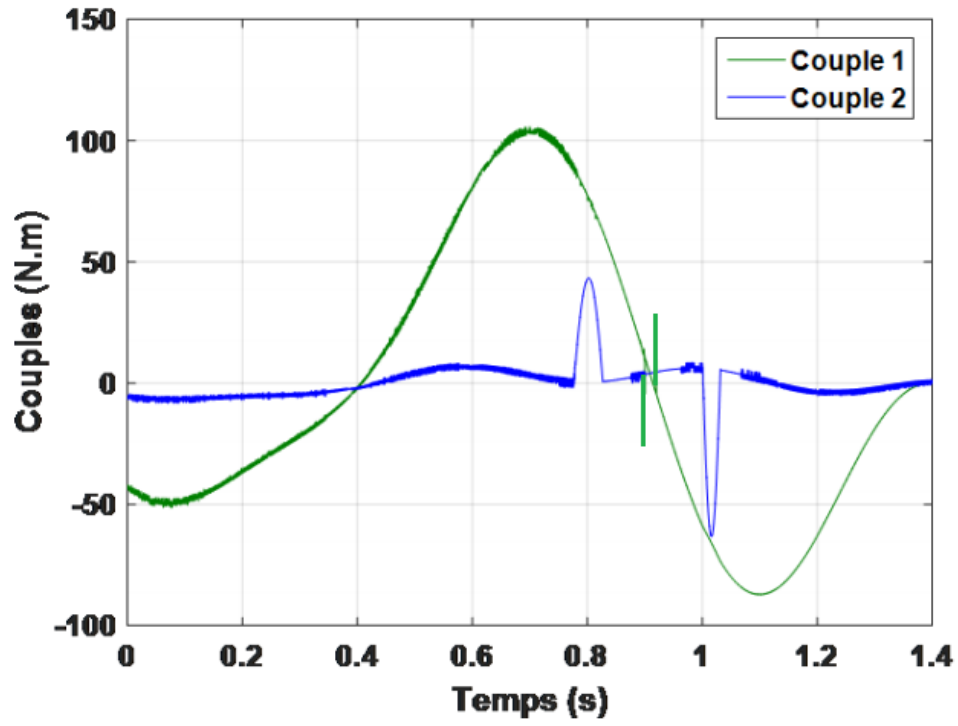


FIG. 4.12 : Commandes SMC avec choc d'impact.

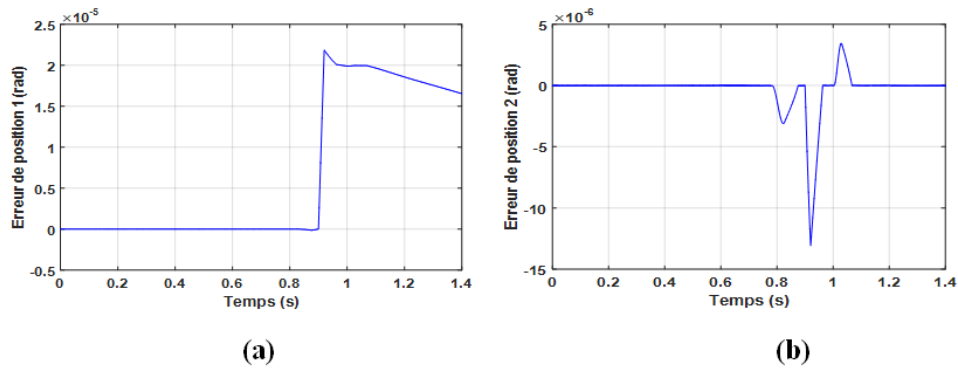


FIG. 4.13 : Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec choc d'impact).

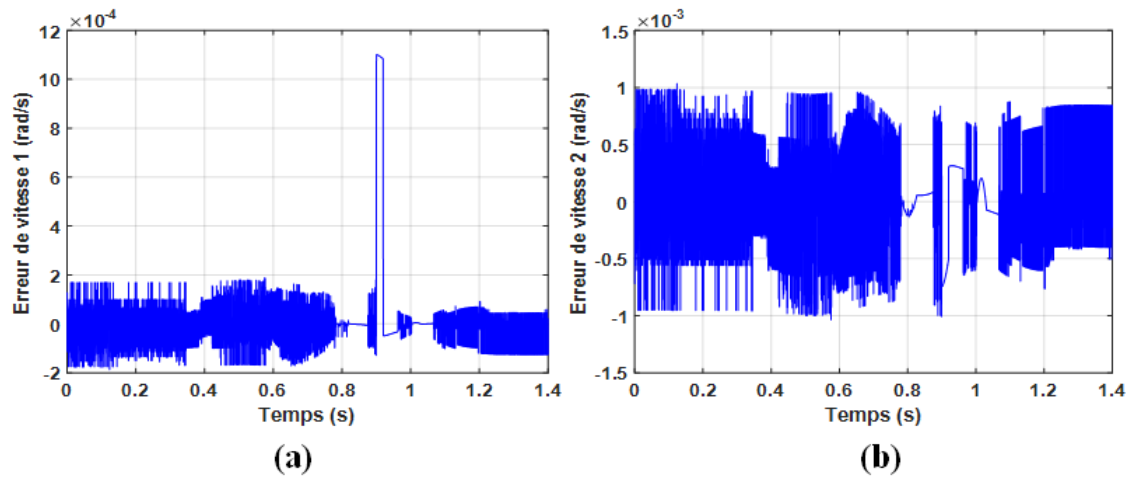


FIG. 4.14 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec choc d'impact).

Synthèse 2

Les résultats présentés dans les Figures (4.11a) et (4.11b) montrent que la commande SMC assure un suivi précis des positions et des vitesses angulaires par rapport aux trajectoires de référence. Cette bonne qualité de poursuite est corroborée par les Figures (4.13) et (4.14), où les erreurs de suivi des variables articulaires restent faibles tout au long de la simulation.

La Figure (4.14) montre également la présence d'oscillations sur les erreurs des vitesses angulaires. Une augmentation de leur amplitude est observée (Figure (4.14a)) à l'instant de l'impact ($t_m = 0,9$ s), en raison de la perturbation impulsionnelle générée par le choc de la balle.

La Figure (4.12) met également en évidence que les couples moteurs demeurent à l'intérieur des limites admissibles des actionneurs spécifiées dans le Tableau (4.4). Bien que de légères oscillations apparaissent sur les signaux de commande, celles-ci sont principalement attribuées au phénomène de *chattering* inhérent à l'utilisation de la fonction signe dans la loi de commande SMC.

Par ailleurs, une faible perturbation des couples (Figure (4.12)) est observée à l'instant de l'impact ($t_m = 0,9$ s), correspondant au choc appliqué lors de la frappe de la balle. Toutefois, cette perturbation est rapidement compensée par le contrôleur, ce qui témoigne de la capacité de la commande SMC à rejeter efficacement les perturbations externes. Ces résultats confirment ainsi la robustesse de la stratégie de commande proposée tout en préservant la stabilité et les performances de suivi du robot golfeur.

4.4.2.3 Test de robustesse aux variations paramétriques

Cette section est consacrée à l'évaluation de la robustesse de la commande SMC face aux variations paramétriques du robot, notamment une modification de l'inertie du club. L'objectif est d'analyser l'impact de cette incertitude sur le comportement du système et sur la qualité du suivi des trajectoires de référence. Les résultats de simulation correspondants sont présentés dans les Figures (4.15), (4.16), (4.17) et (4.18).

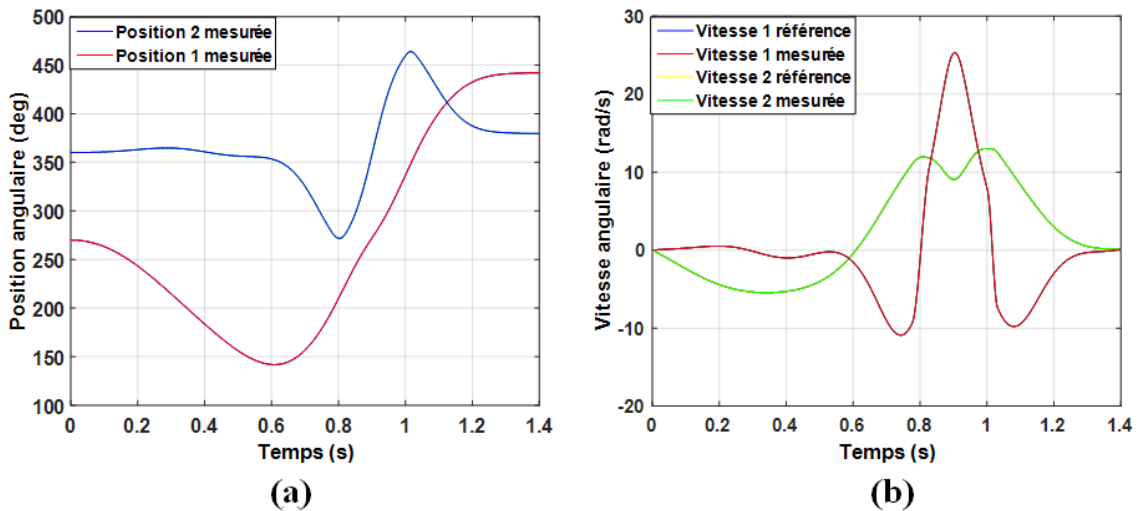


FIG. 4.15 : Suivi des positions et vitesses angulaires (SMC avec test de robustesse).

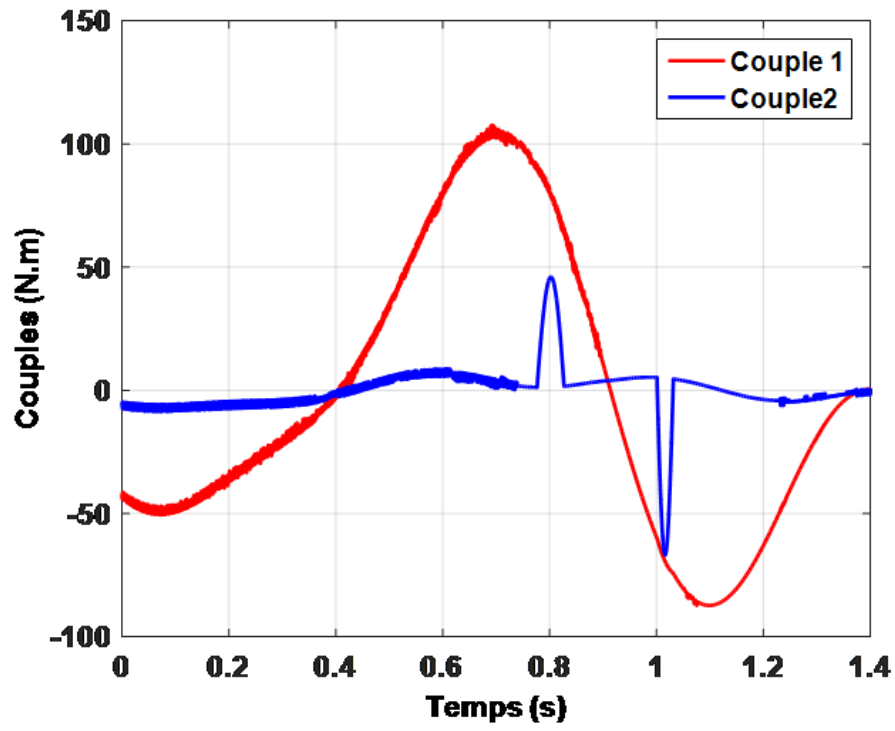


FIG. 4.16 : Commandes SMC avec test de robustesse.

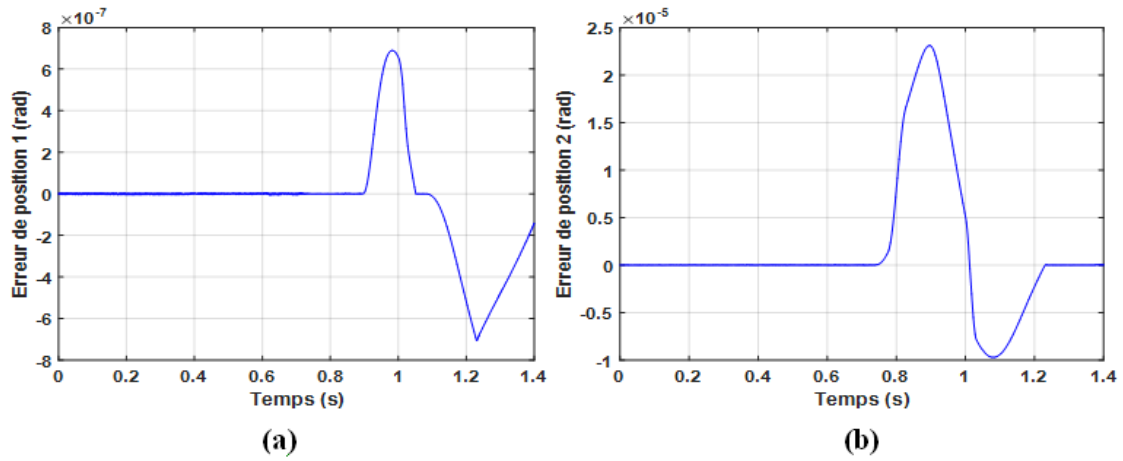


FIG. 4.17 : Erreurs de suivi des positions angulaires (SMC avec test de robustesse).

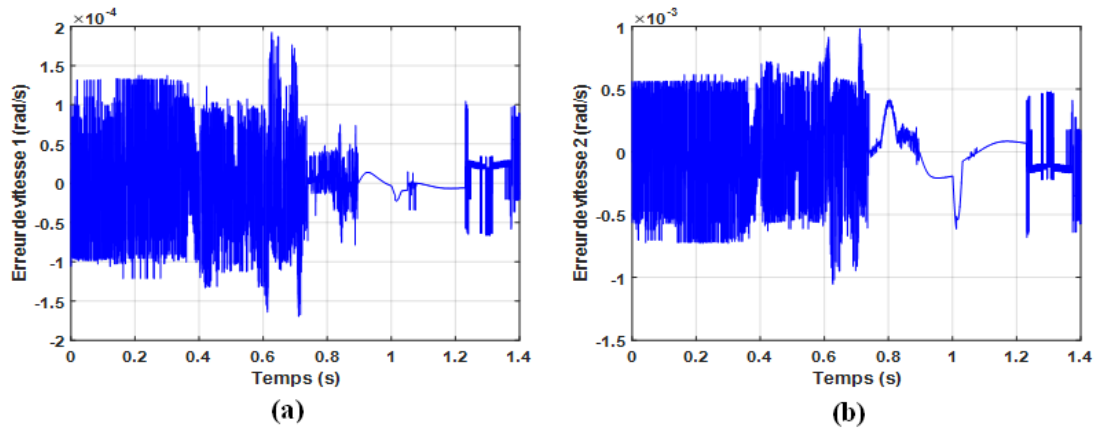


FIG. 4.18 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (SMC avec test de robustesse).

Synthèse 3

Les résultats obtenus, illustrés par la Figure (4.15), montrent que la commande SMC assure un suivi satisfaisant des trajectoires de référence malgré la variation de l'inertie du club. Les erreurs de poursuite, données par les Figures (4.17) et (4.18), restent faibles, traduisant une bonne précision de commande.

De légères oscillations apparaissent au niveau des erreurs des vitesses angulaires (Figure (4.18)) ainsi que des signaux de commande (voir Figure (4.16)). Celles-ci sont principalement attribuées au phénomène de *chattering* caractéristique de la commande SMC. Néanmoins, les couples moteurs demeurent dans les limites admissibles des actionneurs et les performances globales du système ne sont pas affectées.

4.4.3 Simulation du contrôleur FSMC et analyse des performances

Le contrôleur par mode glissant basé sur la logique floue (FSMC), développé précédemment et représenté par le schéma bloc de la Figure (4.4), est appliqué au robot golfeur afin d'évaluer ses performances en matière de suivi de trajectoire et de robustesse. Les simulations réalisées permettent d'analyser son comportement en présence de perturbations externes et d'incertitudes paramétriques, ainsi que sa capacité à atténuer le phénomène de *chattering* tout en préservant la stabilité et la précision du système.

4.4.3.1 Sensibilité au bruit de mesure

L'influence du bruit de mesure sur les performances du contrôleur par mode glissant flou (FSMC) est étudiée afin d'évaluer sa capacité à maintenir un suivi précis des trajectoires de référence en présence d'incertitudes de mesure.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans les Figures (4.19), (4.20), (4.21) et (4.22), permettant d'analyser la robustesse et les performances du système dans ces conditions de fonctionnement.

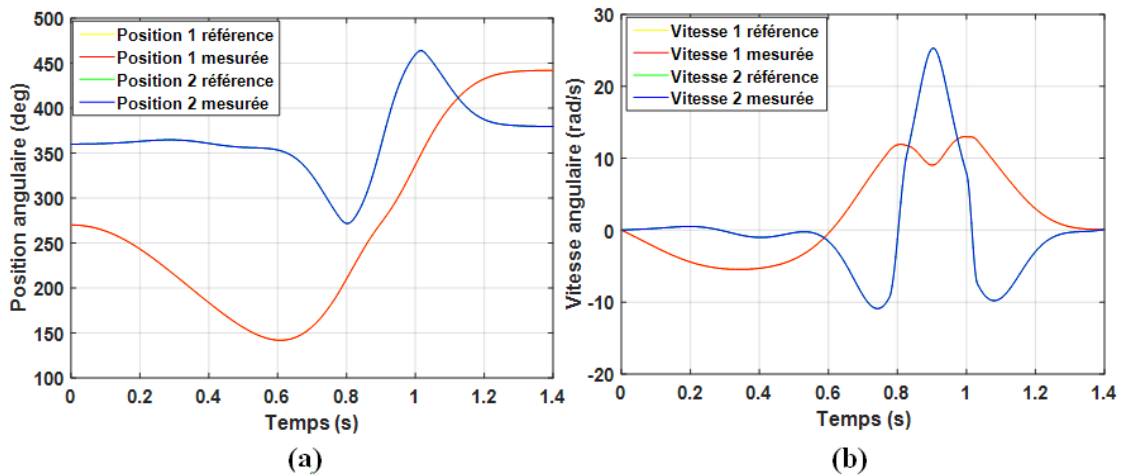


FIG. 4.19 : Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec bruit de mesure).

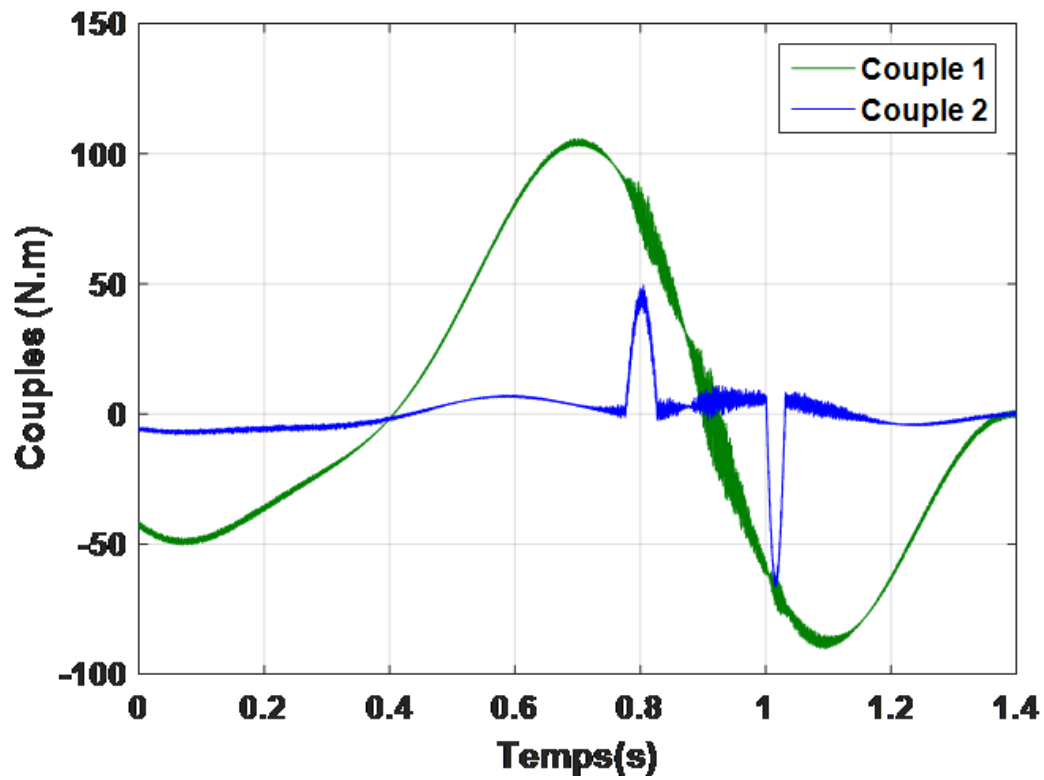


FIG. 4.20 : Commandes FSMC avec bruit de mesure.

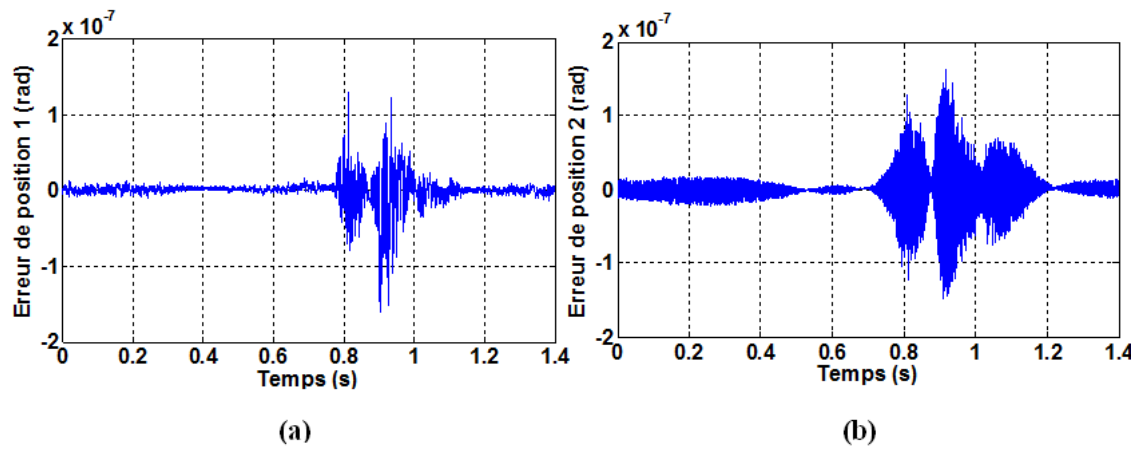


FIG. 4.21 : Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec bruit de mesure).

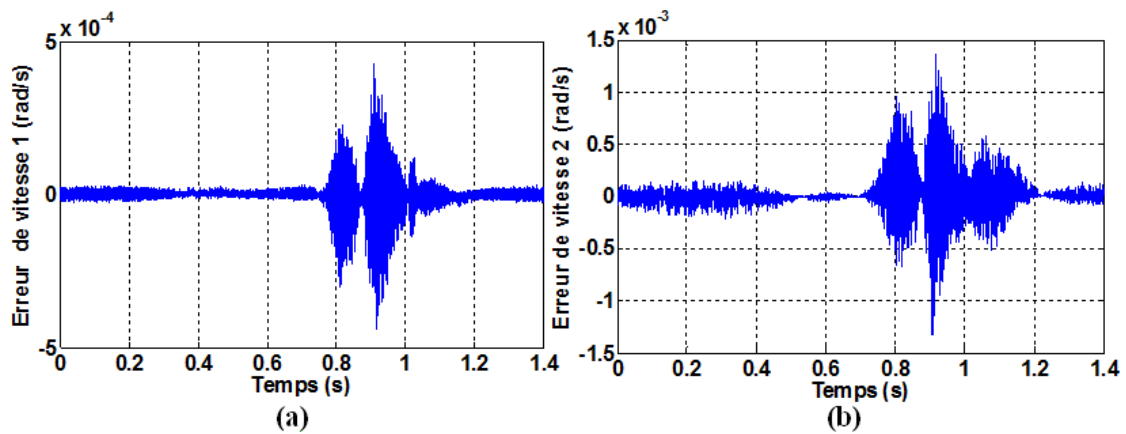


FIG. 4.22 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec bruit de mesure).

Synthèse 4

Les Figures (4.19a) et (4.19b) montrent que le contrôleur FSMC assure un suivi précis des positions et des vitesses angulaires malgré la présence de bruit de mesure. Les erreurs de poursuite présentées dans les Figures (4.21) et (4.22) restent faibles et présentent des fluctuations moins importantes que celles observées avec la commande SMC classique (voir Figure (4.9)), ce qui met en évidence l'efficacité de la logique floue dans la réduction du phénomène de *chattering*.

On constate également que l'augmentation des erreurs se concentre principalement durant la phase d'impact (entre $t = 0,8$ s et $t = 1$ s), associée à une dynamique fortement non linéaire et à une évolution très rapide du système.

Par ailleurs, les couples moteurs (Figure (4.20)) respectent les limites réglementaires des actionneurs et ne présentent que de faibles oscillations, sans affecter la stabilité ni les performances globales du système.

4.4.3.2 Sensibilité au choc d'impact

L'effet d'un choc d'impact sur les performances du contrôleur flou par mode glissant (FSMC) est analysé afin d'évaluer sa capacité à rejeter les perturbations externes et à préserver la qualité du suivi des trajectoires de référence.

Les résultats de simulation correspondants sont présentés dans les Figures (4.23), (4.24), (4.25) et (4.26), permettant d'apprécier la robustesse du contrôleur ainsi que son comportement lors de l'application de cette perturbation impulsionnelle.

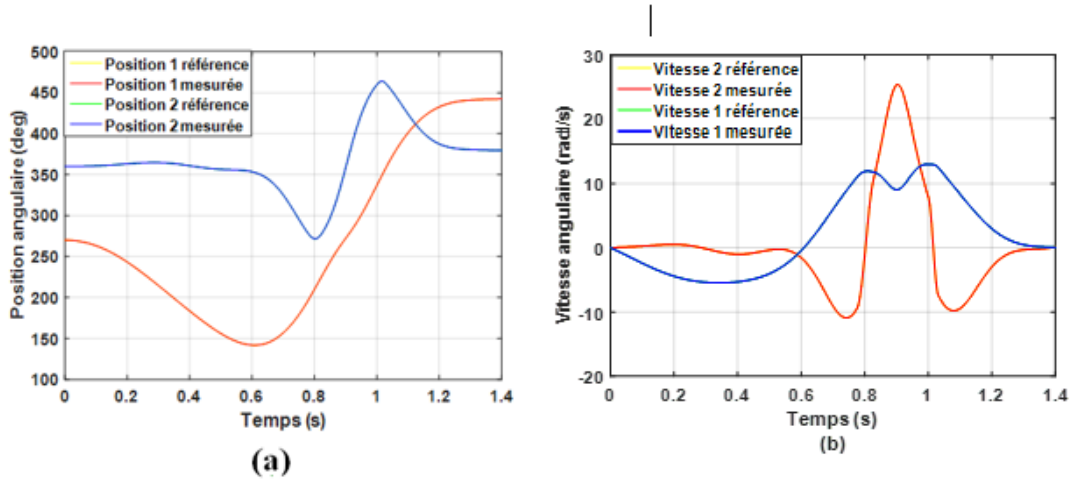


FIG. 4.23 : Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec choc d'impact).

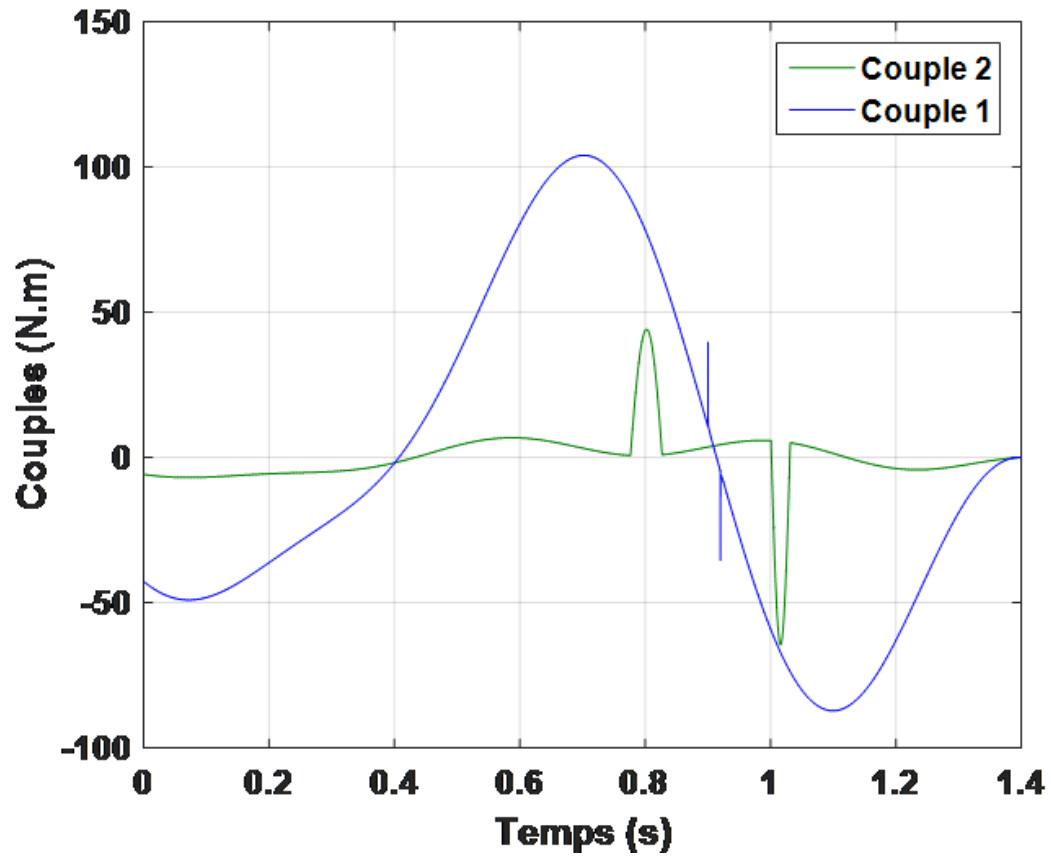


FIG. 4.24 : Commandes FSMC avec choc d'impact.

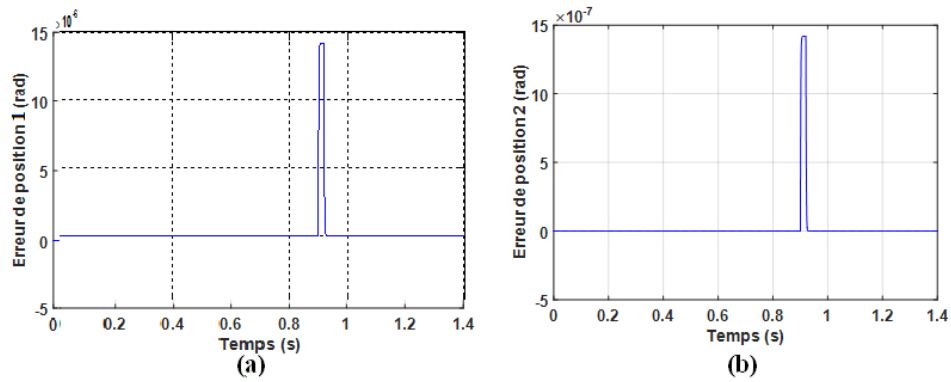


FIG. 4.25 : Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec choc d'impact).

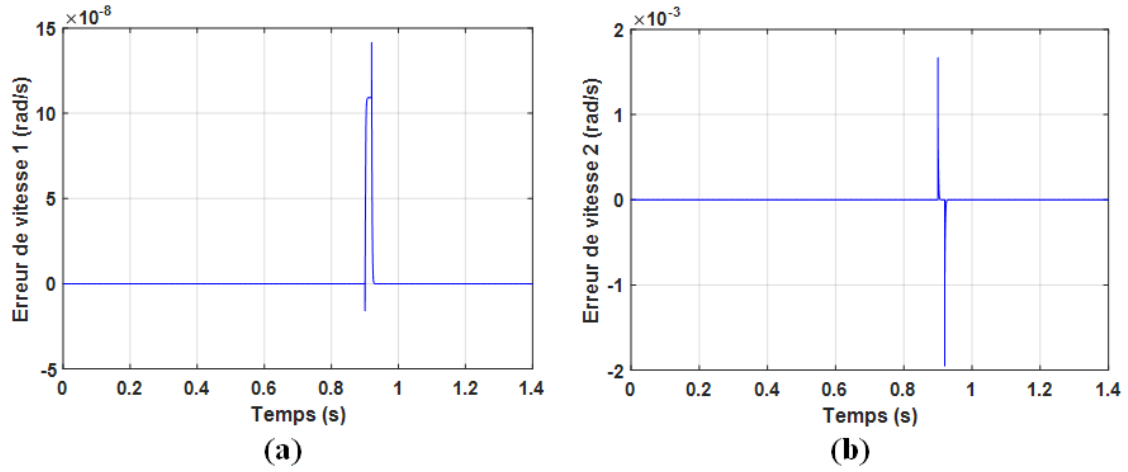


FIG. 4.26 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec choc d'impact).

Synthèse 5

Les résultats illustrés par les Figures (4.23a) et (4.23b) mettent en évidence les performances du contrôleur FSMC, qui assure un suivi précis des positions et des vitesses angulaires par rapport aux trajectoires de référence. Cette qualité de poursuite est confirmée par les Figures (4.25) et (4.26), où les erreurs de suivi demeurent globalement faibles sur l'ensemble de l'horizon de simulation.

Une perturbation transitoire est néanmoins observée à l'instant de l'impact ($t_m = 0,9$ s), induisant une augmentation temporaire des erreurs, en réponse au choc impulsionnel appliqué au système. Malgré cela, le comportement du système converge rapidement vers son régime nominal, ce qui traduit une capacité efficace de rejet des perturbations externes.

Par ailleurs, la Figure (4.24) montre que les couples de commande restent strictement inclus dans les limites admissibles des actionneurs définies dans le Tableau (4.4). De plus, les signaux de commande présentent une évolution continue et régulière, sans apparition de phénomène de *chattering*, confirmant l'apport de la logique floue dans l'amélioration de la loi de commande SMC.

4.4.3.3 Test de robustesse aux variations paramétriques

Afin d'évaluer la robustesse du contrôleur FSMC face aux incertitudes de modélisation, une variation de l'inertie du club est introduite dans le modèle du robot. Cette analyse vise à étudier l'effet de cette perturbation paramétrique sur la qualité du suivi des trajectoires et sur le comportement dynamique du système.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans les Figures (4.27), (4.28), (4.29) et (4.30).

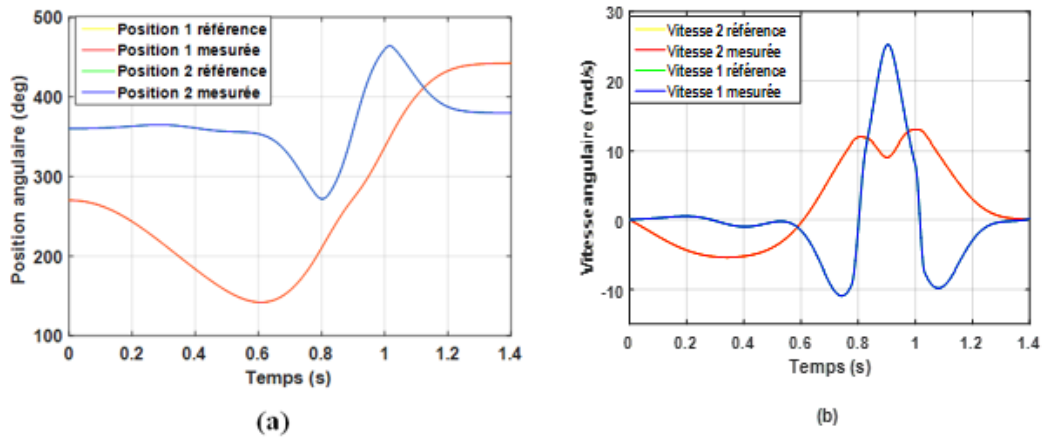


FIG. 4.27 : Suivi des positions et vitesses angulaires (FSMC avec test de robustesse).

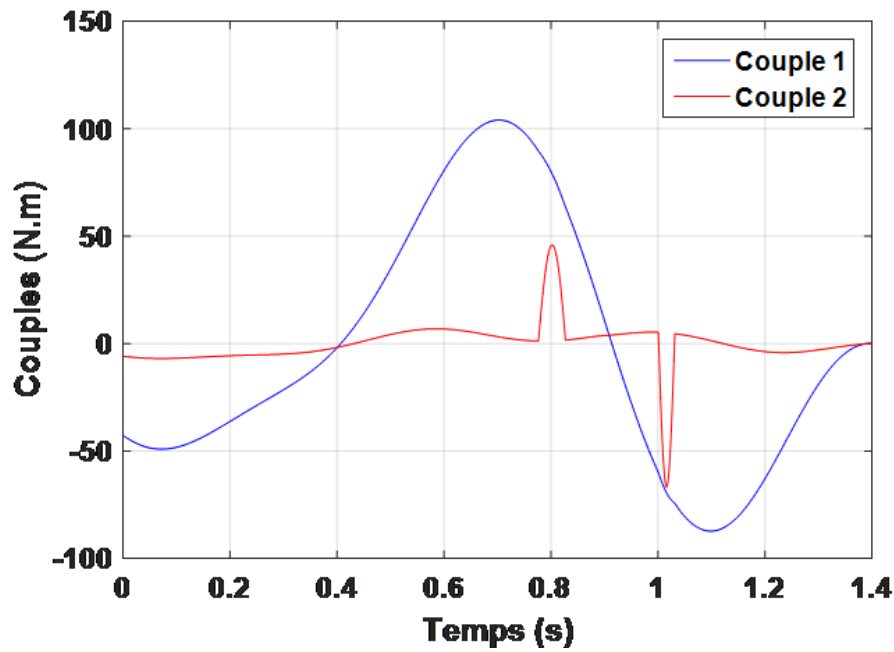


FIG. 4.28 : Commandes FSMC avec test de robustesse.

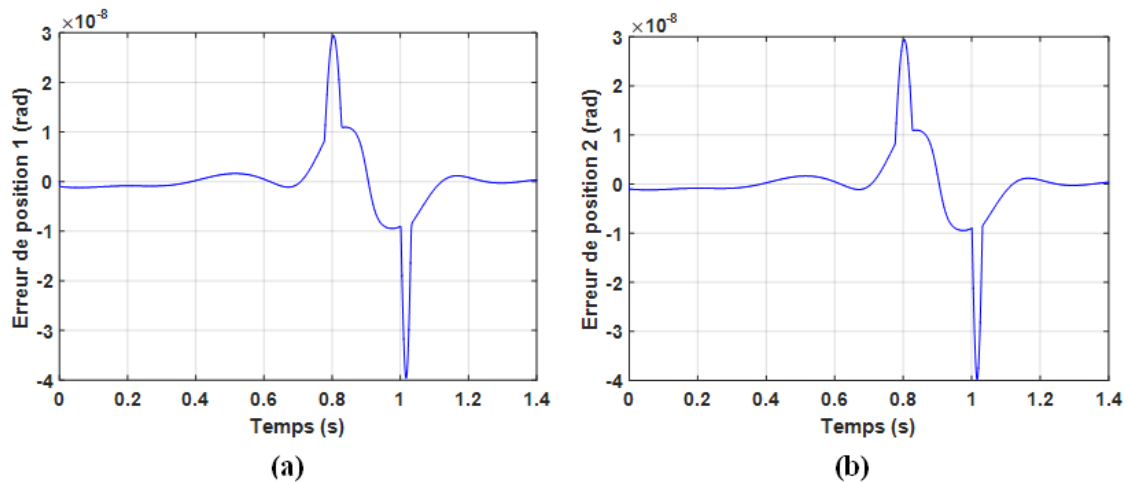


FIG. 4.29 : Erreurs de suivi des positions angulaires (FSMC avec test de robustesse).

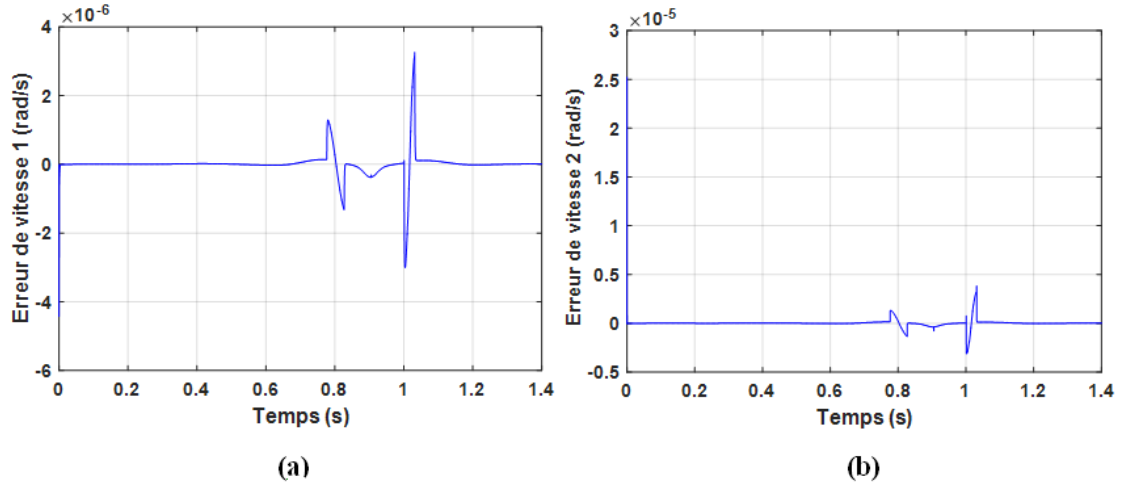


FIG. 4.30 : Erreurs de suivi des vitesses angulaires (FSMC avec test de robustesse).

Synthèse 6 Les résultats obtenus et illustrés par la Figure (4.27) montrent que la commande FSMC assure un suivi satisfaisant des trajectoires de référence malgré la variation de l’inertie du club. Les erreurs de poursuite, présentées dans les Figures (4.29) et (4.30), demeurent globalement faibles, ce qui témoigne d’une bonne précision de la loi de commande.

On observe par ailleurs que l’augmentation des erreurs est principalement localisée durant la phase d’impact du mouvement (entre 0.8 s et 1 s), correspondant à une dynamique fortement non linéaire et ultra-rapide du système.

En revanche, aucune oscillation significative n’apparaît au niveau des signaux de commande, comme le montre la Figure (4.28), ce qui confirme l’absence de phénomène de *chattering* grâce à l’association de la logique floue dans la structure FSMC.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l’évaluation des performances des différentes lois de commande appliquées au robot golfeur, notamment la commande par mode glissant (SMC) et la commande floue par mode glissant (FSMC). Les études ont été menées via des simulations sous MATLAB/Simulink en considérant des conditions réalistes de fonctionnement intégrant des perturbations externes, des chocs d’impact ainsi que des incertitudes paramétriques.

Les résultats obtenus montrent que la commande SMC assure globalement un bon suivi des trajectoires de référence et un rejet efficace des perturbations, ce qui confirme sa robustesse vis-à-vis des variations externes et des incertitudes du modèle. Cependant, l’apparition du phénomène de *chattering*, lié à l’utilisation de la fonction signe, constitue une limitation notable de cette approche. L’intégration de la logique floue dans la commande FSMC permet d’atténuer cet effet indésirable en rendant les signaux de commande plus lisses, sans altérer les performances de suivi ni la stabilité du système.

Par ailleurs, l’analyse des résultats a montré que les erreurs de poursuite dues au choc d’impact sont principalement concentrées autour de l’instant d’impact, correspondant à une phase fortement dynamique et non linéaire du système. De même, les erreurs liées aux variations paramétriques de l’inertie du club apparaissent essentiellement durant la phase hyper-dynamique

du mouvement du robot. Dans les deux cas, la commande SMC joue un rôle essentiel dans le rejet des perturbations et le maintien des performances globales du système.

Ainsi, l'ensemble des résultats confirme l'efficacité des approches robustes étudiées, en particulier la contribution de la logique floue dans l'amélioration de la qualité de commande et la réduction des effets indésirables associés au mode glissant classique.

CONCLUSION GÉNÉRAL

Ce mémoire a porté sur l'étude, la modélisation et la commande robuste d'un robot manipulateur anthropomorphe destiné à reproduire le mouvement de swing d'un golfeur professionnel. Ce mouvement constitue un cas particulièrement intéressant dans le domaine de la robotique avancée en raison de son caractère hyper dynamique, impliquant des vitesses angulaires élevées, de fortes accélérations articulaires ainsi qu'un transfert d'énergie séquentiel entre les différents segments du bras. La reproduction fidèle d'un tel mouvement représente un défi majeur, tant du point de vue de la modélisation dynamique que de la synthèse de lois de commande capables de garantir des performances élevées en présence d'incertitudes et de perturbations.

Dans ce contexte, une architecture robotique inspirée de la biomécanique du membre supérieur humain a été développée afin de reproduire les mécanismes fondamentaux intervenant lors du geste sportif. La modélisation dynamique du système, établie à l'aide du formalisme d'Euler-Lagrange, a permis de mettre en évidence les interactions non linéaires et les couplages dynamiques existant entre les articulations. Une attention particulière a été portée à l'introduction de stoppeurs mécaniques permettant de reproduire les limitations articulaires du poignet et d'améliorer le réalisme du comportement dynamique du système.

Sur le plan de la commande, deux approches robustes ont été étudiées et analysées : la commande par mode glissant classique et la commande par mode glissant basée sur la logique floue. Les résultats obtenus ont démontré la capacité de ces stratégies à assurer la stabilité du système et le suivi précis des trajectoires de référence malgré la présence d'incertitudes paramétriques et de perturbations externes. Les simulations numériques ont également montré que l'intégration de la logique floue permet d'atténuer significativement le phénomène de broutement (chattering) inhérent à la commande par mode glissant conventionnelle, tout en préservant ses propriétés de robustesse. Cette amélioration se manifeste par des profils de couple plus lisses et moins oscillatoires au niveau des actionneurs.

L'ensemble des résultats obtenus confirme ainsi la pertinence de l'approche proposée pour la modélisation et la commande des systèmes robotiques hyper dynamiques. Ils démontrent également l'intérêt de combiner des modèles inspirés de la biomécanique humaine avec des techniques avancées de commande robuste afin d'améliorer les performances dynamiques, la précision et la fiabilité des robots manipulateurs anthropomorphes. Cette démarche ouvre des perspectives prometteuses pour le développement de nouvelles générations de robots capables de reproduire des mouvements humains complexes avec un haut niveau de réalisme et d'efficacité.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche susceptibles d'enrichir et d'étendre les travaux présentés dans ce mémoire :

- Validation expérimentale du modèle proposé à travers la réalisation d'un prototype phy-

sique du robot golfeur afin de confronter les résultats de simulation aux performances réelles du système.

- Prise en compte de modèles dynamiques plus élaborés intégrant notamment les effets de flexibilité des liaisons et du club, les phénomènes de frottement complexes ainsi que la dynamique des actionneurs.
- Extension de l'architecture robotique à un plus grand nombre de degrés de liberté afin de reproduire avec davantage de fidélité la cinématique complète du membre supérieur humain.
- Développement de stratégies de commande adaptatives et intelligentes capables d'ajuster automatiquement leurs paramètres en fonction des variations dynamiques du système et des conditions de fonctionnement.
- Intégration des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, notamment les réseaux de neurones et l'apprentissage par renforcement, afin d'améliorer les capacités décisionnelles du robot.
- Étude de nouvelles approches hybrides de commande robuste combinant la commande par mode glissant avec d'autres techniques avancées telles que la commande prédictive, les algorithmes évolutionnaires ou les systèmes neuroflous.

Ces perspectives constituent autant de voies de recherche pouvant contribuer au développement de systèmes robotiques anthropomorphes toujours plus performants, autonomes et capables de reproduire avec fidélité les mouvements complexes du corps humain.

Bibliographie

- [1] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2009.
- [2] V. M. Zatsiorsky, *Kinetics of Human Motion*. Champaign, IL, USA : Human Kinetics, 2002.
- [3] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Cham, Switzerland : Springer, 2016.
- [4] M. W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2006.
- [5] M. Hubbard, “The biomechanics of golf,” *Sports Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1–13, 1999.
- [6] J. Rosen, B. Hannaford and R. M. Satava, *Surgical Robotics : Systems Applications and Visions*. Boston, MA, USA : Springer, 2011.
- [7] J. J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2005.
- [8] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd ed. London, UK : Springer, 2000.
- [9] M. Ceccarelli, *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science*. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2010.
- [10] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA : Pearson, 2020.
- [11] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 2011.
- [12] G. C. De Vos, *Automata and Mechanical Toys Through History*. Oxford, UK : Oxford University Press, 2008.
- [13] M. Ceccarelli, *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science*. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2010.
- [14] J. Rifkin, *The End of Work*. New York, NY, USA : Putnam Publishing, 1995.

- [15] J. F. Engelberger, *Robotics in Practice : Management and Applications of Industrial Robots*. London, UK : Kogan Page, 1980.
- [16] S. B. Nof, *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd ed. New York, NY, USA : Wiley, 1999.
- [17] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva, Switzerland : World Economic Forum, 2016.
- [18] R. D. Schraft and M. Hägele, “Service robots for mobile manipulation in industrial applications,” *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 31, no. 5, pp. 407–414, 2004.
- [19] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling, Identification and Control of Robots*. London, UK : Hermes Penton, 2002.
- [20] T. Senoo, A. Amiki and M. Ishikawa, “High-Speed Batting using a Multi-joint Manipulator,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1191–1196, 2004.
- [21] A. Ming and C. Xu, *Biologically Inspired Robotics*. CRC Press, pp. 55-84, 2012.
- [22] A. Ming, N. Harada, M. Shimojo and M. Kajitani, “Development of a Hyper Dynamic Manipulator Utilizing Joint Stops,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas. Nevada, pp. 2084–2086, 2003.
- [23] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, *Robotics : Modelling, Planning and Control*, 2nd ed. Springer, 2023.
- [24] M. H. Korayem, H. Tourajizadeh and A. Nikoobin, “Dynamic modeling and safety analysis of robotic manipulators with mechanical joint limits and collision avoidance,” *Int. J. Advanced Robotic Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1–14, 2021.
- [25] C. Xu, A. Ming, K. Mak and M. Shimojo, “Design for High Performance Robot Based on Dynamically Coupled Driving and Joint Stops,” *Int. J. Robot Autom*, vol. 22, no. 4, pp. 281–293, 2007.
- [26] Y. Kim, S. Choi, J. Song and D. Yun, “Modular Multi-axis Elastic Actuator with Torque Sensing Capable p-CFH for Highly Impact Resistive Robot Leg,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, London, UK, pp. 7331–7337, 2023.
- [27] T. Temper, “‘Iron Byron’ Takes Place in World Golf Hall of Fame,” 2007.
- [28] E. A. Hunt and G. J. Wiens, “Design and Analysis of a Parallel Mechanism for the Golf Industry,” in *Proc. Int. Congress on Sound and Vibration*, 2003.
- [29] Y. Hoshino, Y. Kobayashi and G. Yamada, “Vibration Control Using a State Observer that Considers Disturbances of a Golf Swing Robot,” *JSME Int. J.*, 2005.
- [30] Golftek, “Golftek Pro via Golf-Achiever Accuracy Comparison Test Report,” 2001.
- [31] C. C. Chen, Y. Inoue and K. Shibata, “Numerical Study on the Wrist Action During the Golf Downswing,” *Sports Engineering*, vol.10, pp. 23-31, 2007.

- [32] C. Xu, A. Ming, T. Nagaoka and M. Shimojo, “Motion Control of a Golf Swing Robot,” *Int. J. Intelligent Robotic Systems*, vol. 53, no. 3, pp. 277-99, 2009.
- [33] E. A. Hunt and G. J. Wiens, “Design and Analysis of a Parallel Mechanism for the Golf Industry,” in *Proc. Int. Congress on Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden, pp. 7-10, 2003.
- [34] C. Xu, A. Ming, T. Maruyama and M. Shimojo, “Motion Generation for Hyper Dynamic Manipulation,” *Int. J. Mechatronics*, vol. 17, no. 8, pp. 405–416, 2007.
- [35] C. Xu, A. Ming and M. Shimojo, “Motion Planning for Golf Swing Robot Based on Reverse Time Symmetry and PGCTC Control,” in *Proc. IEEE ICRA*, USA. pp. 69-74. 2009.
- [36] C. Xu, Z. Yang, A. Ming and M. Shimojo, “Motion Planning of Golf Swing Robot,” *Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 13–23, 2012.
- [37] A. Ming, C. Xu, M. Shimojo and M. Wada, “Motion Planning for a Dynamically Coupled Hyperdynamic Manipulator by Reinforcement Learning,” in *Proc. IEEE ICMA*, 2011, pp. 1822–1827, 2011.
- [38] S. Benmansour, *Génération de mouvement optimal et commande d’un bras manipulateur hyper dynamique*, PhD thesis, USTO, Algeria, 2016.
- [39] W. Khalil and E. Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*, 2e éd., Hermes Science, 1999.
- [40] S. Benmansour, F. Demim, and A. Z. Messaoui, “Robust control of golf swing robot using backstepping based on fuzzy sliding-mode and super-twisting backstepping sliding-mode algorithms,” *International Journal of Unmanned Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 439–453, 2024.
- [41] S. Benmansour, F. Demim and A. Omari, “ Design of a Sliding Mode Observer based Computed Torque Control,” *J. Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 52, pp. 449–456, 2019.
- [42] S. Benmansour, A. Omari and K. Z. Meguenni, “Motion planning and control of hyper dynamic robot arm,” *International Review of Automation and Control (IREACO)*, vol. 7, no. 1, pp. 82–89, 2014.
- [43] C. Xu, A. Ming, T. Maruyama, and M. Shimojo, “Motion generation for hyper dynamic manipulation,” *Mechatronics*, vol. 17, no. 8, pp. 405–416, 2007.
- [44] S. Benmansour, A. Omari, and K. Z. Meguenni, “ H_∞ observer based computed torque for hyper dynamic manipulator,” in *Proc. Int. Conf. Automatic and Mechatronic (CIAM)*, Oran, Algeria, 2011.
- [45] S. Benmansour, *Génération de mouvement optimal d’une manipulation hyper dynamique*, Magistère thesis, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf (USTO), Oran, Algeria, 2009.

- [46] V. I. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*, 2nd ed., Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2009.
- [47] A. Polyakov and A. Poznyak, “Unified Lyapunov function for a finite-time stability analysis of relay second-order sliding mode control systems, ”. in *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, vol. 29, no. 4, pp. 529–550, Dec. 2012.
- [48] I. Boiko, *Discontinuous Control Systems : Frequency-Domain Analysis and Design*. Boston, MA, USA : Birkhäuser, 2009.
- [49] T. R. Oliveira, L. Fridman, and L. Hsu, Eds., *Sliding-Mode Control and Variable-Structure Systems : The State of the Art*. Cham, Switzerland : Springer, 2023.
- [50] M. Steinberger, M. Horn, and L. Fridman, Eds., *Variable-Structure Systems and Sliding-Mode Control : From Theory to Practice*. Cham, Switzerland : Springer, 2020.
- [51] T. R. Oliveira, L. Fridman, and L. Hsu, Eds., *Sliding-Mode Control and Variable-Structure Systems : The State of the Art*. Cham, Switzerland : Springer, 2023.
- [52] A. F. Filippov, *Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides*. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [53] X.-G. Yan, S. K. Spurgeon, and C. Edwards, *Variable Structure Control of Complex Systems : Analysis and Design*. Cham, Switzerland : Springer, 2017.
- [54] T. R. Oliveira, L. Fridman, and L. Hsu, Eds., *Sliding-Mode Control and Variable-Structure Systems : The State of the Art*. Cham, Switzerland : Springer, 2023.
- [55] Y. Liu, J. Zhang, and Y. Wang, “Robust observer-sliding mode composite control for mechanical systems under uncertain disturbances,” *Scientific Reports*, vol. 16, Art. no. 49206, 2026.
- [56] J. J. E. Slotine, “Sliding controller design for nonlinear systems,” *International Journal of Control*, vol. 40, no. 2, pp. 421–434, 1984.
- [57] Z. Chen and A. Y. Krasnov, “Disturbance observer-based fixed-time sliding mode control for a class of uncertain second-order nonlinear systems,” *AIMS Mathematics*, vol. 10, no. 3, pp. 6745–6763, 2025.
- [58] M. Surov and L. Freidovich, “Sliding mode control and subspace stabilization methodology for the orbital stabilization of periodic trajectories,” *arXiv preprint arXiv :2512.04249*, 2025.
- [59] V.-C. Nguyen and S. H. Kim, “A novel fixed-time prescribed performance sliding mode control for uncertain wheeled mobile robots,” *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 5340, 2025.

- [60] M. Gao, J. Li, T. Hu, J. Luo, and B. Feng, “Intelligent vehicle trajectory tracking with an adaptive robust nonsingular fast terminal sliding mode control in complex scenarios,” *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 31085, 2024.
- [61] Q. Zhang, P. Liu, Y. Chen, Q. Deng, and A. Tong, “Disturbance observer-based terminal sliding mode tracking control for a class of nonlinear SISO systems with input saturation,” *Processes*, vol. 11, no. 7, Art. no. 1878, 2023.
- [62] S. J. Abbasi and S. Lee, “Enhanced trajectory tracking via disturbance-observer-based modified sliding mode control,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, Art. no. 8027, 2023.
- [63] H. Pinto, T. R. Oliveira, and L. Hsu, “Sliding mode control for uncertain systems with time-varying delays via predictor feedback and super-twisting observer,” *arXiv preprint arXiv :2507.21281*, 2025.
- [64] O. T. Makki, S. S. Moosapour, S. Mobayen, and J. H. Nobari, “Observer-based fixed-time sliding mode control for trajectory tracking of a 3-DOF helicopter with uncertainties and input saturations,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 49, pp. 521–544, 2025.
- [65] H. Lou, B. Jiang, and Z. Wu, “Observer-based hybrid event-triggered sliding mode control of uncertain Markov jump systems,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 47, no. 6, 2025.
- [66] Y. Liu, J. Xia, J. Wang, and H. Shen, “Finite-time stability for interval type-2 fuzzy nonlinear systems via an observer-based sliding mode control,” *Journal of Systems Science and Complexity*, vol. 35, pp. 2223–2247, 2022.
- [67] T. R. Oliveira, L. Fridman, and L. Hsu (eds.), *Sliding-Mode Control and Variable-Structure Systems : The State of the Art*, Springer, 2023.
- [68] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer, 1992.
- [69] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information and Control*, 1965.
- [70] E. H. Mamdani, “Application of Fuzzy Algorithms,” *Proc. IEE*, 1974.
- [71] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems,” *IEEE TSMC*, 1985.
- [72] K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, 1998.

Résumé

L'étude du membre supérieur humain constitue une source d'inspiration majeure pour le développement de robots manipulateurs anthropomorphes capables d'exécuter des mouvements rapides, précis et complexes. Parmi ces mouvements, le swing de golf représente un exemple typique de mouvement hyper dynamique, caractérisé par de fortes accélérations et un transfert d'énergie efficace entre les articulations.

Ce mémoire traite de la modélisation et de la commande robuste d'un robot golfeur inspiré du bras humain, dont l'objectif principal est de reproduire le geste d'un golfeur professionnel. À cet effet, un modèle dynamique est élaboré à partir du formalisme d'Euler-Lagrange, intégrant notamment des stoppeurs mécaniques afin de représenter les contraintes articulaires du poignet.

Afin d'assurer des performances satisfaisantes en présence d'incertitudes et de perturbations, des stratégies de commande robuste sont développées. Une comparaison est effectuée entre la commande par mode glissant classique et sa variante basée sur la logique floue. Ces approches sont analysées selon leurs performances en matière de stabilité, de précision de suivi et de robustesse.

Enfin, les simulations réalisées sous MATLAB permettent de valider le modèle proposé et de démontrer l'efficacité des lois de commande retenues. Les résultats obtenus confirment leur capacité à assurer un suivi précis des trajectoires tout en garantissant la stabilité et la robustesse du système face aux perturbations.

Mots-clés : Robots manipulateurs, manipulation hyperdynamique, stoppeurs mécaniques, commande par mode glissant, commande logique floue.

Abstract

The study of the human upper limb has become a major source of inspiration for the development of anthropomorphic robotic manipulators capable of performing fast, precise, and complex motions. Among these movements, the golf swing represents a typical example of a hyper-dynamic motion, characterized by high accelerations and efficient inter-joint energy transfer.

This thesis addresses the modeling and robust control of a golf robot inspired by the human arm, with the main objective of reproducing the motion of a professional golfer. To this end, a dynamic model is developed using the Euler-Lagrange formalism, incorporating mechanical stops to represent wrist joint constraints.

To ensure satisfactory performance in the presence of uncertainties and external disturbances, robust control strategies are designed. A comparative study is carried out between classical sliding mode control and its fuzzy logic-based extension. These approaches are evaluated in terms of stability, trajectory tracking accuracy, and robustness.

Finally, MATLAB simulations are conducted to validate the proposed model and demonstrate the effectiveness of the developed control laws. The obtained results confirm their ability to ensure accurate trajectory tracking while maintaining system stability and robustness against disturbances.

Keywords : Robotic manipulators; hyper-dynamic motion; mechanical stops; sliding mode control; fuzzy logic control.

ملخص

يُشكّل تحليل حركة الطرف العلوي للإنسان مصدر إلهام رئيسياً لتطوير روبوتات قادرة على تنفيذ حركات معقدة، مثل حركة فرط ديناميكية نموذجية كـ (Golf) swing السريعة والدقيقة والمعقدة. ومن بين هذه الحركات، يُعدّ تأرجح الغولف نموذجاً بارزاً لما يتطلبه من سرعة عالية وانتقال فعال للطاقة بين المفاصل.

يتناول هذا العمل نمذجة وتحكم في الذراع البشري، حيث يكمل الهدف الأساسي في إعداد إنتاج حركة لعب غولف مخطوط، ولتحقيق ذلك، تم تطوير نموذج ديناميكي باستخدام أورييس-الجروفيك، مع إدراج أجهزة الحطة الحركة لتمثيل القيود الحركية للمفصل الأربط.

ولضمان الأداء الجيد لأي إطار الاستجابات تحكم مبنية، تم اعتبار استراتيجيات التحكم بالمقارنة المتقدمة ومنها: التحكم بوضع الانزلاق والتحكم المنطق الضبابي الترابطي، وقد تم تقييم هذه الحلول بالمنطق التلقائي، وبغة تتبع المسار والثبات.

وأخيراً، أظهرت المحاكاة باستخدام MATLAB، أنه يمكن من صحة النماذج المقترحة من خلال التحقق وتقييم فعالية البنك المقترحة في حل محاكاة الأداء بتلبية تتبع المسار الدقيق مع الحفاظ على الثبات.

الكلمات المفتاحية: الحركات الروبوتية؛ التحكم فائق الديناميكية الميكانيكية؛ التحكم بوضع الانزلاق؛ التحكم بالمنطق الضبابي.