

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par: Ismahan Chahrazad MEDAGUINE**

Intitulé

**Commande non linéaire tolérante au défaut d'un
bras manipulateur**

Soutenu le 20/06/2023, devant le jury composé de:

ZEGHLACHE Samir	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
LOUKAL Keltoum	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
BENYOUNES Abdelhafid	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord je remercie le bon dieu, le clément de m'avoir donné la foi et le courage de terminer ce projet. Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Mon encadreuse Mme LOUKAL KELTOUM, pour son aide, son soutien et ses conseils qui m'ont fourni une grande motivation à accomplir ce travail. Je tiens également à remercier mon professeur BOUGUERRA ABDERRAHMEN et tous les enseignants Qui nous aider pendant la période d'étude à l'université. Finalement, Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail...

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- *A mon cher père et ma chère mère.*
- *A mes chers frères.*
- *A la mémoire de mes grands-parents.*
- *A toute ma famille.*
- *A tous mes proches.*
- *A tous ceux qui sont chers à mon cœur.*
- *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces	II
Sommaire	III
liste des tableaux	VII
Liste des figures	VII
Introduction Générale.....	1
<i>CHAPITRE 1 : Généralité et modélisation Etat de l'art d'un bras manipulateur</i>	
1.1 Introduction	4
1.2 Historique de la robotique	4
1.3 La robotique	5
1.4 Définition d'un robot.....	6
1.5 Classification des robots	6
1.5.1 Les manipulateurs	6
1.5.2 Les télémanipulateurs.....	6
1.5.3 Les robots	7
1.6 Les caractéristiques d'un robot	8
1.7 Domaines d'applications	9
1.7.1 Domaine industriel	9
1.7.2 Domaine agriculture.....	10
1.7.3 Domaine militaire.....	10
1.7.4 Domaine de service	11
1.7.5 Domaine spatial.....	11
1.7.6 Domaine médical	12
1.8 Les constituants d'un robot	12
1.8.1 Système mécanique articulé	13
1.8.2 Articulation	13
1.8.3 Les Actionneurs	14
1.8.4 Capteurs.....	14
1.9 Configuration singulière.....	16
1.10 Les avantages et les inconvénients de la robotique.....	16
1.10.1 Les avantages de la robotique	16
1.10.2 les inconvénients de la robotique	17
1.11 Modélisation d'un bras manipulateur.....	17

1.12.1	Modèle géométrique direct	18
1.12.2	Modèle géométrique inverse	18
1.13	Modélisation cinématique	18
1.13.1	Modèle cinématique direct.....	18
1.13.2	Modèle cinématique inverse	18
1.14	Modélisation dynamique	19
1.14.1	Modèle dynamique inverse	19
1.14.2	Modèle dynamique direct.....	19
1.15	Formalisme de Lagrange.....	20
1.16	Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 1ddl :.....	20
1.17	Simulation en boucle ouverte d'un bras manipulateur à 1 ddl.....	21
1.18	La commande classique PID	22
1.18.1	Application de la commande par PID d'un bras manipulateur à 1ddl	23
1.18.2	Résultats de simulations	23
1.17.3	Interprétation les résultats de simulation.....	25
1.18	Conclusion.....	25

CHAPITRE 2: Commande par mode glissant d'un bras manipulateur

2.1	Introduction	28
2.2	Système à structure variable.....	28
2.3	La commande par mode glissant.....	29
2.4	Choix de la surface de glissement	30
2.5	Conditions d'existence et de convergence	30
2.5.1	La condition directe de commutation.....	31
2.5.2	Fonction de LYAPUNOV	31
2.6	La détermination de la loi de commande	32
2.6.1	La commande équivalente.....	32
2.6.2	Commande attractive	34
3.6.2.1	La commande signe.....	34
2.6.2.2	Commande continue dans une bande de la surface.....	36
2.7	Le phénomène de chattering	36
2.8	Réduction du phénomène de chattering	37
2.9	Domaine d'application du réglage par mode glissement	38
2.10	Application de la commande par mode de glissement au bras manipulateur	39
2.10.1	Principe de fonctionnement.....	39

2.10.2 Présentations et interprétations des résultats de simulation	40
2.10.3 Résultats de simulation	40
2.10.4 Interprétation les résultats de simulation.....	42
2.11 Conclusion.....	43

CHAPITRE 3: Commande par backstepping d'un bras manipulateur

3.1 Introduction	45
3.2 Méthodes de Lyapunov	45
3.3 Principe de l'approche du Backstepping.....	45
3.4 Les avantages et les inconvénients de la commande par Backstepping.....	46
3.4.1 les avantages.....	46
3.4.2 Les inconvénients.....	46
3.5 Méthode générale de synthèse par Backstepping.....	46
3.6 Application de la commande par backstepping au bras manipulateur.....	49
3.7 Présentations des résultats de simulation	50
3.8 Interprétation les résultats de simulation.....	53
3.9 Conclusion.....	53

Chapitre4 : Commande tolérante au défaut d'un bras manipulateur

4.1 Introduction	55
4.2 Défaut	55
4.3 Les Différents Types de Défauts.....	55
4.3.1 Défauts actionneurs	56
4.3.2 Défauts capteurs	56
4.3.3 Défauts dans le système (Défauts composants)	56
4.4 Classification des Défauts	57
4.4.1 Classification selon leur représentation	57
4.4.1.1 Défaut additif	57
4.4.1.2 Défaut multiplicatif	57
4.4.2 Classification selon leur évolution dans le temps	57
4.4.2.1 Défaut brusque	58
4.4.2.2 Défaut graduel.....	58
4.4.2.3 Défaut Intermittent	58
4.5 Tolérante aux défauts	58
4.6 Détection de défauts	59
4.7 Identification de défauts	59

4.8 Commande Tolérante aux Défauts	59
4.9 Classification des techniques de commande tolérante aux défauts.....	59
4.10 Approche active	60
4.11 Les avantages de la commande tolérante aux défauts active	61
4.12 Application de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant d'un bras manipulateur ..	61
4.13 Présentations et interprétations des résultats de simulation	62
4.14 Application de la commande tolérante au défaut à base de backstepping d'un bras manipulateur ...	64
4.15 Présentations et interprétations des résultats de simulation	64
4.15.1 Interprétations	67
Conclusion.....	67
Conclusion Générale :	70
Références bibliographie.....	72

liste des tableaux

Tableau 1. 1: les paramètres d'un bras manipulateur à 1ddl.....	22
---	----

Liste des figures

CHAPITRE 1:

Figure 1. 1: Premier robot uni mates en 1961.....	4
Figure 1. 2: Robot manipulateur	7
Figure 1. 3: Robot didactique Tobbie KSR18	8
Figure 1. 4: Robot mobile autonome.....	8
Figure 1. 5: Système d'emballage de produits pharmaceutiques ultra flexible.	10
Figure 1. 6: Un robot autonome pour le semis et le sarclage.	10
Figure 1. 7: Un robot géant militaire quadrupède.	11
Figure 1. 8: Un robot de service.....	11
Figure 1. 9: Le premier robot sur mars[14]. Figure 1. 10: Robot rover martien.....	12
Figure 1. 11: Un robot dirigé par un chirurgien au niveau de l'abdomen.....	12
Figure 1. 12: constituants d'un robot	13
Figure 1. 13: Symbole de l'articulation rotoïde	14
Figure 1. 14: Symbole de l'articulation prismatique.....	14
Figure 1. 15: Chaînes simples ouvertes	16
Figure 1. 16: Chaînes complexes	16
Figure 1. 17: Un bras de robot tournant dans un plan vertical	20
Figure 1. 18: Schéma de simulation d'un bras manipulateur à 1 ddl.	22
Figure 1. 19: la réponse du bras manipulateur à 1 ddl en BO.....	22
Figure 1. 20: Schéma bloc d'un régulateur PID	23
Figure 1. 21: Structure de la commande par PID.....	23
Figure 1. 22: Les réponses du système par la commande PID pour un entrée échelon.	24
Figure 1. 23: Les réponses du système en BF pour une entrée sinusoïdale.	25

CHAPITRE 2:

Figure 2. 1: Convergence du système glissant.....	31
Figure 2. 2: la commande équivalente ueq	34
Figure 2. 3: Représentation de fonction « sign » de Un.....	35
Figure 2. 4: Surface de glissement et la commande discontinue	35
Figure 2. 5: Loi de commande par bande continue au voisinage de la surface de glissement selon Slotine.....	36
Figure 2. 6: Phénomène de chattering.....	37

Figure 2. 7: Fonction de saturation sat.	38
Figure 2. 8: Fonction de saturation cont.....	38
Figure 2. 9: structure de la commande par mode glissant.....	40
Figure 2. 10: Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée échelon.	41
Figure 2. 11: Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.	42

CHAPITRE 3:

Figure 3. 1: Structure de la commande par backstepping.	51
Figure 3. 2: Les résultats de simulation de la commande par backstepping, pour une entrée échelon. ...	52
Figure 3. 3: Résultats de simulation de la commande par backstepping, pour une entrée sinusoïdale. ...	53

CHAPITRE 4:

Figure 4. 1: Répartition des différents défauts d'un processus.	56
Figure 4. 2: Défaut additif.....	57
Figure 4. 3: Défaut multiplicatif.....	57
Figure 4. 4: Répartition temporelle des défauts.	58
Figure 4. 5: Organigramme de la CTD.	60
Figure 4. 6: CTD active.....	61
Figure 4. 7: structure de la commande par mode glissant avec défaut.....	61
Figure 4. 8: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée échelon.....	62
Figure 4. 9: Résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.	63
Figure 4. 10: Structure de la commande par backstepping avec défaut.....	64
Figure 4. 11: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping, pour une entrée échelon.....	65
Figure 4. 12: Résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping, pour une entrée sinusoïdale.	66
Figure 4. 13: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping et par mode glissant, pour une entrée échelon.	67

Symboles:

$\boldsymbol{\tau}$: Le vecteur des couples/forces des actionneurs.

\boldsymbol{q} : Le vecteur des positions articulaire.

$\dot{\boldsymbol{q}}$: Le vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\boldsymbol{q}}$: Le vecteur des accélérations articulaires.

n : Nombre de degré de liberté.

L : Lagrangien du système.

E_c : Énergie cinétique totale du système.

E_p : Énergie potentielle totale du système.

l : Longueur du bras manipulateur.

m : La masse du bras manipulateur.

u : Couple moteur.

g : Accélération de la pesanteur.

J : Moment d'inertie du bras manipulateur.

K_d : Gain dérivé d'un PID.

K_i : Gain intégral d'un PID.

K_p : Gain proportionnel d'un PID.

s : La surface de glissement.

λ : Une constante positive.

r : Un degré relatif.

U : La commande par mode de glissement.

U_{eq} : La commande équivalente.

U_n : La commande discontinue.

V : Fonction de Lyapunov.

K : Gain dispositif.

α : Constante positive.

ϕ : commande virtuelle.

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'utilisation croissante de robots marque l'évolution des processus industriels. Ces robots sont principalement employés pour accroître le volume de production et améliorer sa qualité. Les robots manipulateurs trouvent une multitude d'applications dans divers domaines tels que la médecine et l'industrie. Avec l'augmentation des contraintes dans ces domaines, les questions relatives à la précision et à la vitesse des robots sont devenues des sujets courants et actuels. En effet, les défauts ont un impact direct sur ces deux caractéristiques[1].

La commande par mode de glissement fait partie de la famille des contrôleurs à structure variable, c.à.d. des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes. L'importance des contrôleurs par mode glissant réside dans : la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, et la robustesse vis-à-vis la variation des paramètres internes ou externes[2].

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre les trajectoires du système à atteindre une surface spécifique appelée surface de glissement, et de s'y maintenir par la suite. Cependant, la commande par mode de glissement peut entraîner en pratique des commutations à haute fréquence, connues sous le nom de chattering. Ces commutations rapides peuvent exciter des dynamiques indésirables, risquant de déstabiliser, détériorer voire même détruire le système étudié[3].

Il existe différentes méthodes pour réduire ce phénomène, dont l'une consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue autour de la surface de glissement. Cela peut être réalisé en utilisant des fonctions telles que la fonction de saturation ou la fonction sigmoïde, qui permettent de lisser les commutations et de diminuer les variations rapides des commandes[4].

La méthode de Backstepping est une procédure récursive utilisant la théorie de Lyapunov dans la recherche de la loi de commande et dans l'étude de la stabilité. Dans la technique du Backstepping, il s'agit de choisir une fonction de l'état comme étant l'entrée d'un sous-système et de procéder de la même manière récursivement jusqu'à obtenir la commande à appliquer au système global. Cette procédure de conception comme son nomen anglais "Backstepping" l'indique, veut dire marche arrière ou étape arrière ; puisque la procédure commence à la sortie du système et fait des pas en arrière à travers des intégrateurs du système en sélectionnant les valeurs désirées des composantes de l'état jusqu'à ce que l'entrée actuelle de la commande soit atteinte[5].

Dans la technique du Backstepping, il s'agit de trouver une fonction de Lyapunov qui permet de déduire une loi de commande pour le système tout en montrant la stabilité globale.

Un problème majeur existe dans le développement de cette approche dite Backstepping. La difficulté réside dans la détermination des matrices de régression et du nombre des paramètres inconnus et augmente avec chaque étape du processus de développement de la méthode du Backstepping[5].

La commande Non Linéaire Tolérante aux Défauts est de fournir une solution à la fréquence des problèmes et de réduire les coûts de leurs traitements. Ainsi, le problème qui se pose n'est pas tellement de discuter quelle technique de contrôle de la machine à utiliser mais surtout comment assurer un niveau de performances minimales du système d'entraînement faisant l'objet d'un défaut de fonctionnement[6].

L'objectif de cet étude est appliquer des commandes non linéaire au bras manipulateur à un degré de liberté afin d'améliorer ses performances. Dans ce contexte, ce traité est divisé en quatre chapitres. Par conséquent :

Premier chapitre : nous présenterons une vue générale sur la robotique, notamment les robots manipulateurs, et modéliserons un bras manipulateur à un degré de liberté. Puis nous appliquerons la commande PID

Deuxième chapitre : Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la commande par mode glissant, en explorant ses concepts généraux et en l'appliquant à notre système spécifique. Ensuite, nous présenterons les résultats de simulation réalisée.

Troisième chapitre : dans ce chapitre, nous aborderons le principe de la commande par backstepping appliquée au contrôle du bras manipulateur à 1ddl. De plus, nous exposerons les résultats de simulation que nous avons obtenus pour évaluer l'efficacité de cette approche.

Quatrième chapitre : Dans ce chapitre, nous traiterons la thématique de la commande tolérante aux défauts, en analysant de manière approfondie les différents types de défauts et leur classification. Nous illustrerons également les résultats de simulations appliquées au bras à 1 ddl pour réaliser une étude comparative entre les commandes précédemment mentionnées, afin d'évaluer leur performance et leur capacité à faire face aux défauts.

A la fin, nous terminerons cette mémoire par une conclusion générale et des perspectives

CHAPITRE 1

Généralité et modélisation Etat de l'art d'un bras manipulateur

1.1 Introduction

Dans le monde industriel, l'automatisation joue un rôle essentiel dans le développement. Elle contribue à réduire la dépendance à l'égard de la main-d'œuvre humaine tout en améliorant l'efficacité et la productivité. L'automatisation occupe une place prépondérante, notamment dans le secteur de la fabrication, où elle est utilisée pour produire divers équipements sophistiqués que nous utilisons au quotidien, tels que les équipements médicaux (machines de radiographie, scanners, etc.), les réfrigérateurs, les automobiles, et bien d'autres [5].

Parmi ces équipements, les bras robotiques sont largement utilisés dans l'industrie. Un bras robotique peut être comparé à une main humaine, avec des articulations permettant à la fois la rotation et le déplacement du bras. Ces mouvements sont généralement générés par des actionneurs tels que des moteurs électriques, des systèmes pneumatiques ou hydrauliques. Un microcontrôleur programmable, généralement équipé d'une unité centrale de traitement (CPU), est utilisé pour contrôler ces actionneurs et exécuter une séquence de tâches prédéfinies [5].

Les bras robotiques industriels sont conçus pour offrir des performances fiables et sont largement utilisés dans la production de masse. Ils sont capables d'effectuer des tâches répétitives avec précision et rapidité, ce qui améliore l'efficacité des opérations industrielles. Ces robots apportent une contribution significative à l'automatisation de nombreux processus de fabrication, permettant ainsi d'optimiser la production et de réduire les coûts.

1.2 Historique de la robotique

La robotique est passée par plusieurs générations comme suit :

- 1947 : Premier manipulateur électrique télé-opéré.
- 1954 : Premier robot programmable.
- 1961 : Utilisation d'un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION (USA), sur une chaîne de montage de General Motors [7].



Figure 1. 1: Premier robot uni mates en 1961[8].

- 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.

- 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.
- 1973 : PREMIER ROBOT MOBILE A ROUES
- 1978 : Le robot ARGOS. Développé à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France). Le robot ARGOS simule la navigation d'un robot mobile équipé d'un système de vision au fur et à mesure de ses déplacements.
- 1979 : Le robot HILARE. Les chercheurs du L.A.A.S. de Toulouse (France) étudièrent la planification des trajectoires d'un robot mobile ponctuel, dans un environnement totalement connu.
- 1981 : Le robot VESA. Ce robot, construit à l'I.N.S. A (France) de Rennes, il est équipé d'un arceau de sécurité pour réaliser la détection d'obstacles dans un environnement totalement inconnu.
- 1984 : Le robot FLAKEY. Ce robot, conçu et construit au Stanford Research Institute est le reflet des améliorations apportées par 14 années de développement. Le robot FLAKEY est équipé de deux roues motrices avec encodeurs, mais sa vitesse maximale est de 66 cm/s au lieu de quelques centimètres par seconde. Ce robot est capable de naviguer dans des environnements réels.
- 1993 : Les robots ERRATIC et PIONNER. Le robot ERRATIC a été conçu par Kurt Konolige, au Stanford Research Institute, comme un robot mobile de faible coût pour ses cours de robotique.

Les robots mobiles actuels : A présent la plupart des travaux de recherche portent sur les problèmes de perception. Ainsi, la planification de trajectoires, l'analyse et la modélisation de l'environnement de robot, sont appliquées sur des robots mobiles commerciaux. Également la recherche actuelle s'oriente vers la conception mécanique des robots mobiles pour des applications hautement spécialisées, comme l'exploration sous-marine, les robots volants et le micro robot [9].

1.3 La robotique

La robotique est une science qui fait intervenir un grand nombre de connaissances : la conception des systèmes, les mathématiques, la mécanique, l'électronique, les asservissements, la fluide, l'informatique, l'analyse de la gestuelle et de la scène dans un environnement. L'intelligence artificielle permet les prises de décisions et les modifications du comportement. On arrive à une image grossière de l'homme [10].

Le terme « robot » est bien plus récent. En 1920, Karel Capek a employé le mot « robota » dans l'une de ses pièces de théâtre pour désigner un androïde capable d'accomplir les tâches qui lui ont été imposées. Dans le terme « robota » (tchèque) est inclus la notion de corvée les

gestes effectués par l'androïde ne sont pas une fin en soi mais un moyen pour réaliser une tâche[11].

1.4 Définition d'un robot

Le Petit Larousse définit un robot comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable. L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel [12].

1.5 Classification des robots

La classification des robots est délicate selon leurs fonctionnalités et leurs potentialités. Les robots peuvent être classés en trois grandes catégories :

1.5.1 Les manipulateurs

Les manipulateurs sont des systèmes mécaniques conçus pour effectuer de manière autonome des tâches répétitives dans un environnement fixe et structuré. Leurs mouvements, enregistrés dans une mémoire, se répètent de façon cyclique. Ils sont souvent appelés "automates" car ils ne disposent pas de fonctions de décision pour réagir aux événements imprévus. Les manipulateurs sont utilisés dans divers domaines tels que la peinture, le soudage par position et la manipulation d'objets [5].

1.5.2 Les télémanipulateurs

Le télémanipulateur, également connu sous le nom de robot de téléportation, est un système mécanique à articulations multiples et multifonctionnel conçu pour assister les humains lors d'opérations effectuées dans des environnements hostiles ou pour aider les personnes handicapées. Il se compose de deux entités distinctes : un bras maître et un bras esclave. Le bras esclave reproduit instantanément les mouvements imposés par un opérateur sur le bras maître. Ce dernier peut être composé d'une boîte à boutons, d'une poignée de commande ou d'une structure articulée similaire à celle du bras esclave. Malgré la nécessité de la présence d'un opérateur, ce système possède des capacités comparables à celles des robots avancés :

- Prise de décision lors de vision réduite.
- Retour d'effort vers le bras maître.
- Amplification ou atténuation des mouvements.
- Autonomie de l'esclave pour alléger la charge de travail à l'homme.
- Création de mouvements élémentaires autonomes.

L'application des télémanipulateurs est répandue dans les domaines nucléaires (manipulation des produits radioactifs), spatial (exploration des planètes), sous-marin (forage), militaire (déminage) et médical (prothèse)[13].

1.5.3 Les robots

Pour cette classe on peut distinguer :

- **Les robots manipulateurs industriels**

Un robot manipulateur industriel constitue l'association d'un manipulateur et d'organes apte à acquérir, traiter et gérer des informations issues de l'environnement. Ils sont dotés de sens artificiels (vision, tactile. . .) et de ressources méthodologiques leur permettant de résoudre des problèmes de difficultés toutefois limitées [13][14].

Ces robots sont essentiellement orientés vers les applications nécessitent une Adaptabilité à la tâche : assemblage, soudage à l'arc, vérification, test. . . etc.



Figure 1. 2: Robot manipulateur [15].

- **Les robots didactiques**

Sont de version ou format réduite des robots. Ils ont un rôle de formation et d'enseignement, ils peuvent aussi être utilisés pour effectuer des tests de faisabilité d'un poste robotisé.



Figure 1. 3: Robot didactique Tobbie KSR18 [16].

▪ Les robots mobiles autonomes

Les possibilités sont plus vastes, du fait de leur mobilité. Notamment, ils peuvent être utilisés en zone dangereuse (nucléaire, incendie, sécurité civil, d'édémontage. . . etc.), inaccessible (océanographie, spatial), de tels robots font appel à des capteurs et `a des logiciels sophistiqués. On peut distinguer deux types de locomotion : les robots marcheurs qui imitent la d'édemarche humaine, et les robots mobiles qui ressemblent plus à des véhicules [13][14].

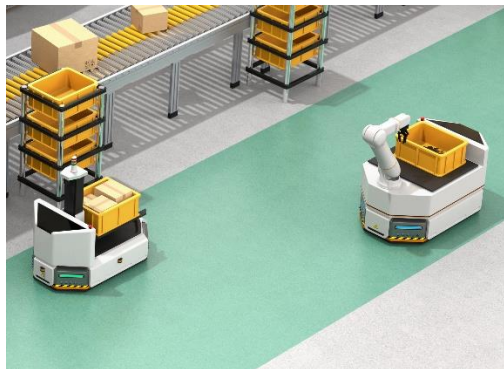


Figure 1. 4: Robot mobile autonome [17].

1.6 Les caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

- La charge maximale transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élóngation maximale).
- L'architecture du S.M.A., le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace de travail (reachable Works pace), également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation. L'espace

de travail dextre (dextrous workspace) est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'effecteur (organe terminal).

- Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel)
- « Défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien » et le point atteint est calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position et à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.
- La répétabilité, ce paramètre caractérise la capacité qu'a le robot à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximale de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 mm.
- La vitesse de déplacement (vitesse maximale en élongation maximale), accélération.
- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance [18].

1.7 Domaines d'applications

Les robots sont des machines polyvalentes et programmables qui sont utilisées dans une variété de domaines pour effectuer des tâches spécifiques de manière autonome ou en collaboration avec les humains. Leur adoption croissante a ouvert de nouvelles perspectives et opportunités dans de nombreux secteurs, transformant la façon dont nous travaillons, produisons et interagissons avec notre environnement [19].

1.7.1 Domaine industriel

Depuis leur apparition sur les chaînes de production dans les années 1970, les robots industriels ont gagné en importance dans de nombreux secteurs où les opérations d'assemblage et de manipulation de produits sont fréquentes. Au cours des trois dernières décennies, les progrès technologiques ont contribué à rendre les robots plus flexibles, plus rapides et plus précis. Aujourd'hui, ils jouent un rôle prépondérant pour [19]:

- Les manipulations de produits à haute cadence.
- Les opérations de packaging avec des manipulations de produits et d'emballage.
- L'assemblage de produits (secteurs automobile, pharmaceutique, cosmétique...etc).



Figure 1. 5: Système d'emballage de produits pharmaceutiques ultra flexible [20].

1.7.2 Domaine agriculture

Après des décennies d'expérimentation et d'exploration, les robots ont enfin fait leur entrée dans le domaine de l'agriculture. Une machine entièrement autonome, fonctionnant à l'énergie solaire, parcourt les rangées de cultures pour surveiller et analyser les plantes. Ce robot a déjà réussi de nombreux tests réalisés dans des champs de légumes, se concentrant principalement sur la surveillance de la santé des plantations. Équipé de nombreux capteurs, détecteurs et caméras, il peut rapidement repérer d'éventuelles anomalies telles que la présence de mauvaises herbes, d'animaux nuisibles ou une croissance insuffisante. L'exploitant agricole est averti en temps réel, lui permettant de prendre immédiatement les mesures appropriées pour résoudre les problèmes identifiés [21].



Figure 1. 6: Un robot autonome pour le semis et le sarclage [22].

1.7.3 Domaine militaire

L'utilisation croissante des robots dans le domaine militaire est devenue une réalité. Grâce aux avancées en matière de miniaturisation, il est désormais possible de créer des robots discrets dotés de multiples capteurs, ce qui en fait des outils idéaux pour les missions d'espionnage et de reconnaissance. De plus, certains de ces robots sont même équipés d'armements, leur

permettant d'opérer dans des environnements hostiles avec pour objectif de remplacer les soldats afin de réduire les pertes humaines[23].



Figure 1. 7: Un robot géant militaire quadrupède [24].

1.7.4 Domaine de service

Ces dernières années, la révolution de la robotique a conduit à une utilisation croissante des robots domestiques, qui prennent en charge les tâches à la place de leurs propriétaires. Ces robots sont désormais capables de réaliser des activités telles que le ménage, la tonte de la pelouse, le nettoyage de la piscine, et bien d'autres encore. Ce qui était autrefois réservé à des applications spécifiques ou coûteuses est désormais devenu accessible pour un usage récréatif. Les robots compagnons, par exemple, sont de plus en plus prisés, allant des applications de jouets pour enfants aux humanoïdes destinés à remplacer une présence humaine[19].



Figure 1. 8: Un robot de service [25].

1.7.5 Domaine spatial

Les manipulateurs mobiles spatiaux sont conçus pour explorer des environnements inaccessibles à l'homme, souvent mortels. Aujourd'hui, l'histoire de la conquête spatiale est étroitement liée à celle de la robotique, et actuellement, plusieurs robots sont en activité tant sur la station spatiale internationale que sur la planète Mars. Les missions d'exploration futures

feront également appel aux robots et à leur intelligence artificielle (IA), que ce soit pour relever de nouveaux défis ou pour approfondir notre connaissance de notre système solaire. Cependant, ces machines seront de plus en plus diversifiées, car des études sont en cours pour développer des robots de toutes tailles, aux fonctions et modes de déplacement variés, capables d'accomplir des tâches distinctes de manière autonome ou en parfaite synergie avec les humains [19].



Figure 1. 9: Le premier robot sur mars [26].



Figure 1. 10: Robot rover martien [19].

1.7.6 Domaine médical

Le domaine médical connaît une augmentation croissante de l'utilisation des robots, que ce soit pour des procédures médicales simples telles que les échographies ou pour des interventions chirurgicales plus délicates. Ces robots ne sont pas entièrement autonomes, mais ils assistent les médecins et les chirurgiens, allant même jusqu'à permettre des opérations médicales à distance grâce à la télémédecine. Cette convergence entre la chirurgie et la technologie est connue sous le nom de chirurgie assistée, qui intègre les dernières avancées des technologies informatiques et robotiques dans la pratique médico-chirurgicale. Bien que cette pratique de "chirurgie assistée" soit encore émergente et peu répandue, elle est en voie de devenir la chirurgie du futur [26].



Figure 1. 11: Un robot dirigé par un chirurgien au niveau de l'abdomen [27].

1.8 Les constituants d'un robot

On distingue classiquement 4 parties principales dans un robot manipulateur :

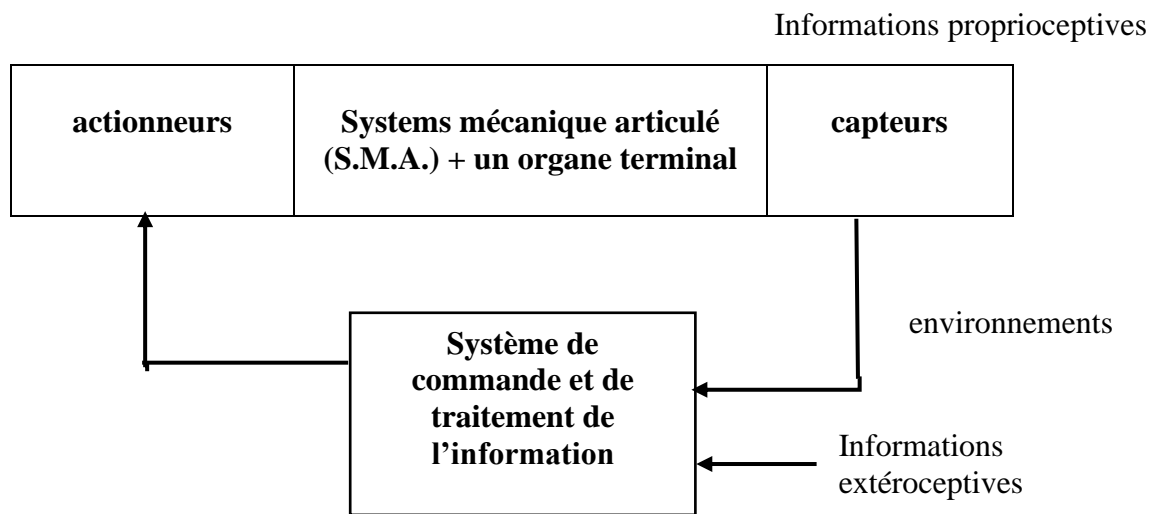


Figure 1. 12: constituants d'un robot [28].

1.8.1 Système mécanique articulé

Le système mécanique articulé est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Son but est de remplacer ou de prolonger l'action d'un bras humain en amenant un organe terminal dans une position et une orientation spécifique, en respectant des caractéristiques de vitesse et d'accélération prédéfinies. Ce dispositif est composé d'une chaîne cinématique de corps, généralement rigides (ou supposés tels), reliés par des articulations.

Sa propulsion est assurée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations à travers des systèmes appropriés[29].

1.8.2 Articulation

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que : $0 \leq m \leq 6$. Lorsque $m = 1$; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique [30].

- **Articulation rotoïde**

Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe (Figure 1.11) [31].



Figure 1. 13: Symbole de l'articulation rotoïde [32].

- **Articulation prismatique**

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe (Figure 1.12).



Figure 1. 14: Symbole de l'articulation prismatique [32].

1.8.3 Les Actionneurs

Les actionneurs constituent l'outil indispensable pour convertir l'énergie hydraulique, électrique ou pneumatique en énergie mécanique. Cette conversion se fait par des mouvements rotatifs (moteurs) ou par des mouvements de translation linéaire (vérins à simple ou à double effet) [33][26].

- **Actionneurs électriques**

Le type de moteur se diffère selon le domaine d'utilisation, on trouve les moteurs à courant continu, moteurs pas à pas, synchrones et asynchrone...

- **Actionneurs pneumatiques et hydrauliques (vérins)**

C'est un actionneur de conception robuste et de simplicité de mise en œuvre, il est utilisé dans toutes les industries manufacturières. Il permet de reproduire les Actions manuelles d'un opérateur telles que : soulever, pousser, tirer, plier, serrer...et on a plusieurs sortes de vérins : simple effet, double effet, angulaire...[32].

1.8.4 Capteurs

Ce sont des outils de perception qui permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement, ils ont comme fonction de lire les variables relativement au mouvement du robot pour permettre un contrôle convenable. Il existe deux types de capteurs tels que [32] :

- **Les capteurs proprioceptifs**

Ils mesurent l'état mécanique interne du robot (comme les capteurs de position, de vitesse ou d'accélération).

- **Les capteurs extéroceptifs**

Ils recueillent des informations sur l'environnement (comme la détection de présence, mesure de distance... etc.).

1.8.4 Les espaces relatifs aux robots

- **L'espace articulaire**

C'est celui dans lequel est représentée la situation de tous ses corps ; on utilise les variables articulaires.

- **L'espace opérationnel**

C'est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal, on utilise des coordonnées cartésiennes, sphérique et cylindrique [32].

Autre particularité des robots :

- **La redondance**

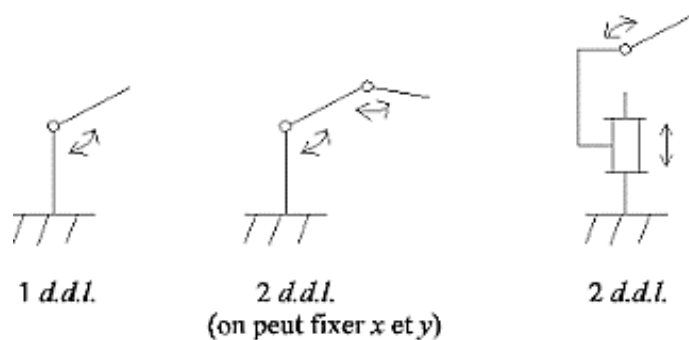
Un robot est redondant lorsque le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre de degrés de liberté de l'espace articulaire.

- **Le degré de liberté (d.d.l.)**

Le nombre de d.d.l. d'un mécanisme est le nombre de paramètres indépendants qui permettent de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement [26][34].

Exemples

- **Chaînes simples ouvertes**



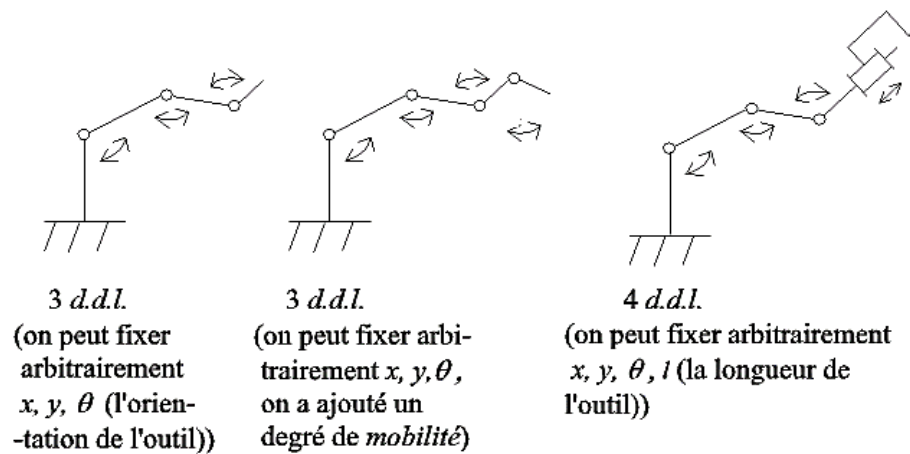


Figure 1. 15: Chaînes simples ouvertes [35].

- Chaînes complexes

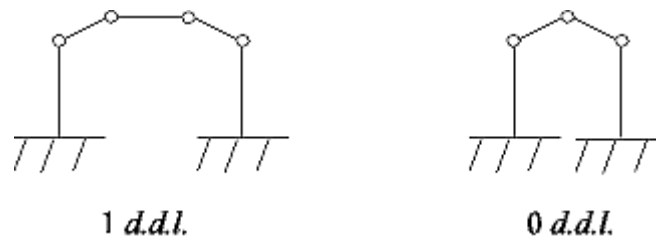


Figure 1. 16: Chaînes complexes [35].

1.9 Configuration singulière

Pour tous les robots qu'ils soient redondants ou non, il se peut que dans certaines configurations dites singulières ; le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal soit inférieur à la dimension de l'espace opérationnel [26].

1.10 Les avantages et les inconvénients de la robotique

À mesure que le nombre de robots dans notre vie continue d'augmenter, il est devenu essentiel de réfléchir aux avantages qu'ils apportent, tout en tenant compte des problèmes créés par les effets de l'automatisation [23][36].

1.10.1 Les avantages de la robotique

Comme souligne Jean-François Germain, directeur commercial de la filiale France de Kuka, un des leaders de la construction de robots : « C'est idéal pour les entreprises qui tournent en continu comme les verreries, les forges ou les fonderies ». Dans certains secteurs tels que le soudage, les robots peuvent effectuer le travail de cinq personnes à la fois, avec presque la même précision que les humains. Donc par conséquent, les robots sont plus rentables que les

humains et moins chers au long terme. En dehors de la rentabilité et le coût, la robotique a beaucoup d'autres avantages comme [23][36] :

- Les robots peuvent travailler dans un environnement dangereux, sans le besoin de soutien de la vie, ou des considérations concernant la sécurité.
- Les robots n'ont pas besoin de l'éclairage, la climatisation, de ventilation et de protection contre le bruit.
- Les robots sont capables de travailler rapidement et peuvent effectuer des tâches répétitives de manière continue, y compris pendant la nuit.
- Les robots peuvent être beaucoup plus précis que les humains. Précision linéaire d'un robot typiquement est de 20 à 10 microns.

1.10.2 les inconvénients de la robotique

Comme rien n'est parfait, les robots présentent également des caractéristiques limitées et des inconvénients. Parmi ces inconvénients, on peut citer [23] [36]:

- Le manque de capacité de réagir en cas d'urgence.
- Les robots ne sont pas totalement autonomes, car ils sont contrôlés par l'homme. Cela signifie que la robotisation crée de nouveaux emplois, tels que des postes de contrôle et de surveillance des robots.
- L'utilisation croissante des robots entraîne une destruction massive d'emplois dans de nombreux pays qui les adoptent.
- Consommation d'énergie.

1.11 Modélisation d'un bras manipulateur

Pour concevoir et commander des robots, il est nécessaire de calculer certains modèles mathématiques, notamment ceux qui permettent de transformer les informations entre l'espace opérationnel (où se trouve l'organe terminal) et l'espace articulaire (où est définie la configuration du robot). Ces modèles incluent :

- Les modèles géométriques directs et inverses, qui expriment la position de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et vice versa.
- Les modèles cinématiques directs et inverses, qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.
- Les modèles dynamiques, qui permettent de déterminer les relations entre les forces ou couples exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations. Ces modèles définissent les équations de mouvement du robot.

1.12 Modélisation géométrique

Dans la modélisation géométrique on s'intéresse au mouvement sans tenir compte des forces qui le provoquent[37] .

1.12.1 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires.

Le modèle géométrique direct du robot peut être représenté par la relation:

$$X = f(q) \quad (1.1)$$

q : Étant le vecteur des variables articulaires tel que $q = [q_1 q_2 \dots q_n]^T$

Les coordonnées opérationnelles sont définies par: $X = [x_1 x_2 \dots x_m]^T$

1.12.2 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles[38] .

$$q = g(X) \quad (1.2)$$

1.13 Modélisation cinématique

Le modèle cinématique exprime les relations entre les vitesses articulaires de chaque joint et les vitesses cartésiennes d'un point de la chaîne cinématique, généralement l'organe terminal on distingue[39] :

1.13.1 Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique directe décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires, Il est noté:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (1.3)$$

Où $J(q)$ désigne la matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du bras manipulateur.

1.13.2 Modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaires \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle \dot{X} imposée, il s'écrit donc:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (1.4)$$

Le modèle cinématique inverse (MCI) donne les vitesses articulaires (\dot{q}) correspondants à une vitesse désirée \dot{X} de l'organe terminal.

Le modèle cinématique inverse s'obtient par la solution d'un système d'équations linéaires soit analytiquement, soit numériquement, les solutions analytiques diminuent le nombre d'opérations de façon remarquable par rapport aux solutions numériques, mais il faut traiter les cas singuliers séparément. Les solutions numériques sont plus générales, et traitent tous les cas de la même façon[40].

1.14 Modélisation dynamique

Le modèle dynamique joue un rôle important dans la conception et le fonctionnement des robots. Pour la conception, le modèle dynamique inverse peut être utilisé pour choisir les actionneurs, alors que le modèle dynamique direct est utilisé pour effectuer des simulations, afin de tester les performances du robot[41].

Plusieurs approches sont proposées pour obtenir le modèle dynamique des robots, les plus utilisées sont la formulation de Newton-Euler et la formulation de Lagrange. L'approche de Newton-Euler est basée sur l'équilibre des forces et des moments qui agissent entre les articulations. La formulation de Lagrange est une approche basée sur l'énergie. Pour le même manipulateur, les deux approches donnent les mêmes équations du mouvement[41].

1.14.1 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse est utilisé pour calculer les couples actionneurs, qui sont nécessaires pour réaliser un mouvement souhaité. En absence des frottements et d'autres perturbations, le modèle dynamique général d'un robot manipulateur est donné par[41] :

$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1.5)$$

q : Vecteur des variables articulaires de dimension $(n \times 1)$.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires de dimension $(n \times 1)$.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations de dimension $(n \times 1)$.

Γ : Vecteur des couples appliqués aux articulations de dimension $(n \times 1)$.

$M(q)$: Matrice d'inertie du robot de dimension $(n \times n)$ symétrique définie positive

$C(q, \dot{q})\dot{q}$: Vecteur des forces de Coriolis et centrifuges de dimension $(n \times 1)$.

$G(q)$: Vecteur des forces de gravité de dimension $(n \times 1)$.

1.14.2 Modèle dynamique direct

Exprime la position, la vitesse et l'accélération des articulations en fonction des couples appliqués, il est obtenu par inversion du modèle précédent.

La détermination du modèle dynamique peut être réalisée en utilisant différents formalismes mathématiques, mais le plus couramment utilisé est [41] :

1.15 Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du système, ce qui se traduit, lorsqu'effort extérieur sur l'organe terminal est supposé nul, par l'équation suivante :

$$\Gamma_j = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial l}{\partial q_j} = \tau_j \quad (1.6)$$

- $i = 1, \dots, n$.
- n = nombre de degré de liberté.
- L = lagrangien du système égal à $E_c - E_p$.
- E_c = énergie cinétique totale du système.
- E_p = énergie potentielle totale du système.

1.16 Modélisation dynamique d'un bras manipulateur à 1ddl :

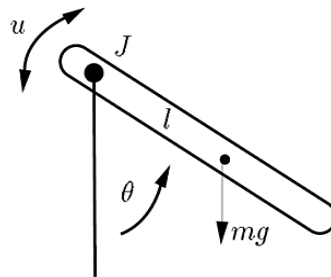


Figure 1. 17: Un bras de robot tournant dans un plan vertical.

Avec :

- q : position angulaire.
- l : longueur de base.
- m : la masse.
- u : couple moteur.
- g : accélération de la pesanteur.
- $J = ml^2$: moment d'inertie du bras.

Pour commencer la modélisation, nous allons décrire le comportement du bras manipulateur en utilisant un modèle de connaissance, en introduisant le Lagrangien suivant :

$$L = E_c - E_p \quad (1.7)$$

$$EC = \frac{1}{2} ml^2 \dot{q}^2 \quad (1.8)$$

$$Ep = mg(1 - \cos(q)) \quad (1.9)$$

Où :

E_c : l'énergie cinétique.

E_p : l'énergie potentielle.

l : la longueur du bras manipulateur.

q : position angulaire.

Donc, on obtient :

$$L = \frac{1}{2} ml^2 \dot{q}^2 - mg(1 - \cos(q)) \quad (1.10)$$

Soit l'équation d'Euler Lagrange suivante :

$$\sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (1.11)$$

$n = 1$: pour un degré de liberté.

$\Gamma = u$: commande à l'entrée du système.

Les équations différentielles associées sont formulées de la manière suivante :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = ml^2 \dot{q} \quad (1.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = ml^2 \ddot{q} \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = -mgl \sin(q) \quad (1.14)$$

Selon l'expression de Lagrange, l'équation du système peut être exprimée comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = u \quad (1.15)$$

$$ml^2 \ddot{q} + mgl \sin(q) = u \quad (1.16)$$

L'équation du système peut également être écrite de la manière suivante :

$$\ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin(q) + \frac{1}{ml^2} u \quad (1.17)$$

1.17 Simulation en boucle ouverte d'un bras manipulateur à 1 ddl

Les paramètres du bras manipulateur à 1 ddl sont (Tab.1) :

Paramètre	Désignation	Valeur numérique
1	La longueur du bras manipulateur.	1 m

g	Accélération de la pesanteur.	10 m/s^2
m	La masse.	0.25 kg
T	Le temps de simulation	60 secs
q_d	Position angulaire	10 degrés

Tableau 1. 1: les paramètres d'un bras manipulateur à 1dl.

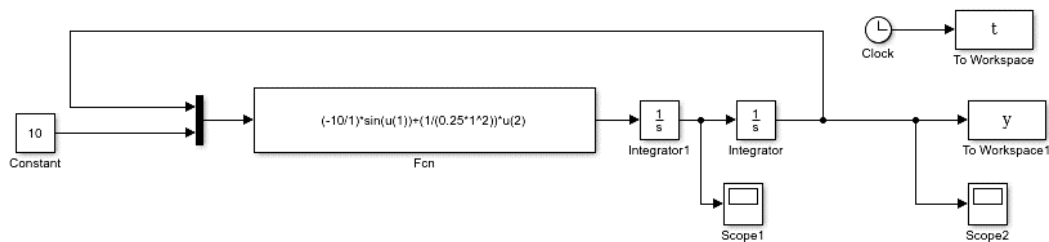


Figure 1. 18: Schéma de simulation d'un bras manipulateur à 1 ddl.

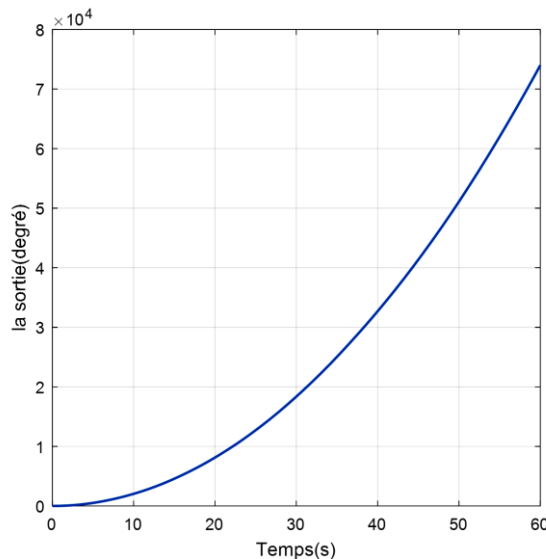


Figure 1. 19: la réponse du bras manipulateur à 1 ddl en BO.

1.18 La commande classique PID

Le régulateur PID, également connu sous le nom de correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé), est un système de contrôle utilisé pour réaliser un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou d'un procédé. Il est composé d'un comparateur qui mesure l'écart (erreur) entre la valeur mesurée et la consigne souhaitée, ainsi que d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme aux spécifications requises [42][43].

Le régulateur PID permet de maintenir la variable contrôlée aussi proche que possible de la consigne en ajustant de manière appropriée les actions proportionnelle, intégrale et dérivée. Cela permet d'obtenir une régulation précise et réactive du système industriel. La forme classique de l'algorithme PID peut être exprimée comme suit :

$$u_{PID} = k_p e(t) + k_i \int_0^T e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.18)$$

Où k_p, k_i, k_d sont respectivement les gains proportionnels.

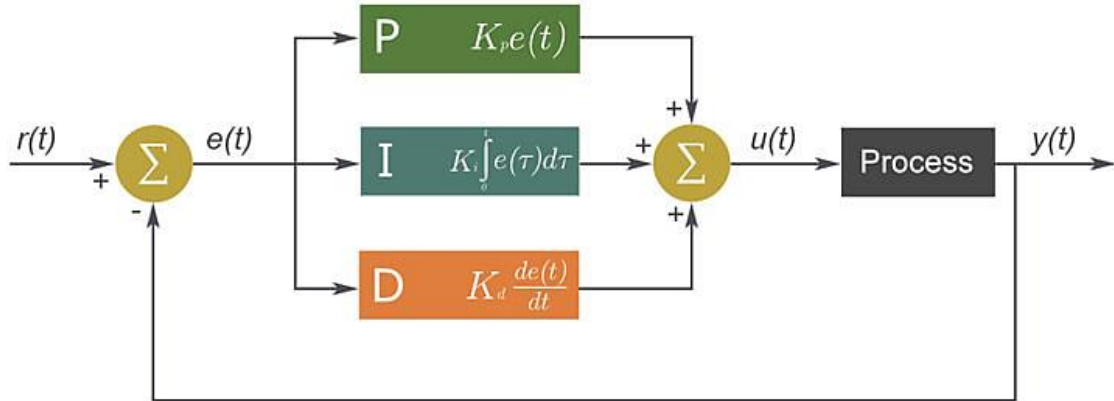


Figure 1. 20: Schéma bloc d'un régulateur PID [44].

1.18.1 Application de la commande par PID d'un bras manipulateur à 1ddl

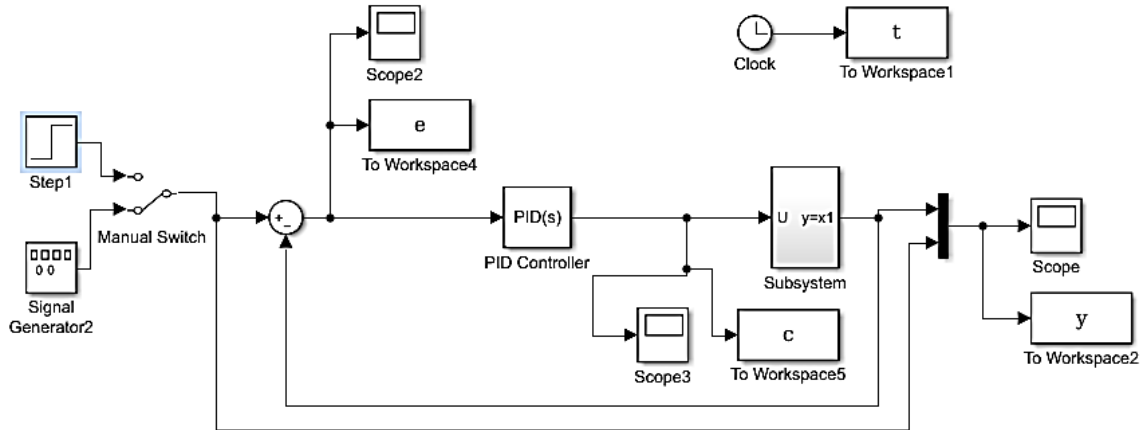
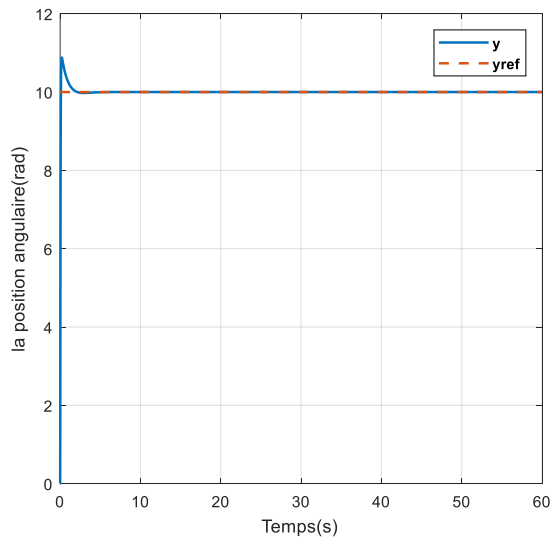


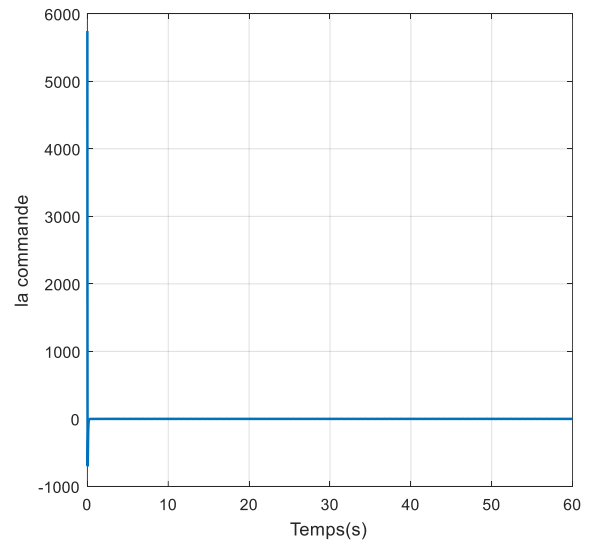
Figure 1. 21: Structure de la commande par PID.

1.18.2 Résultats de simulations

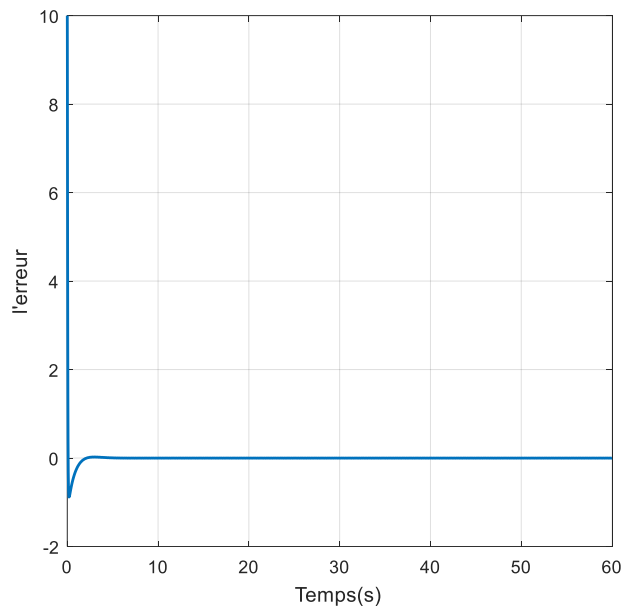
Les paramètres des gains d'un régulateur PID sont : $k_p = 13.5$; $k_i = 8.12$; $k_d = 5.61$.
 Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon d'amplitude 10 sont représentées par la figure 1.20 :



a. La sortie du système



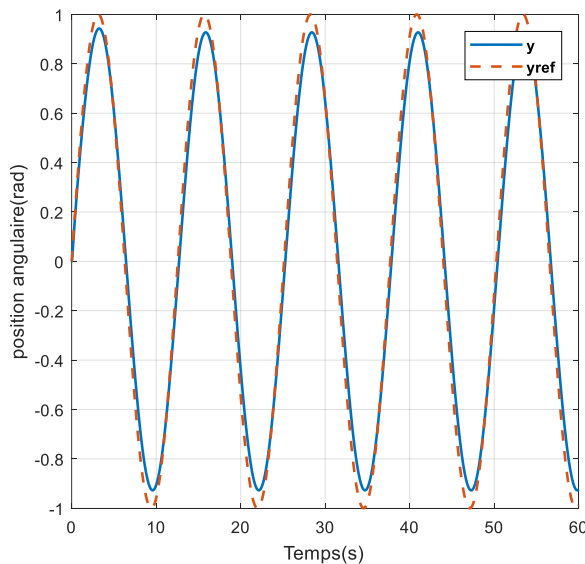
b. La commande du système



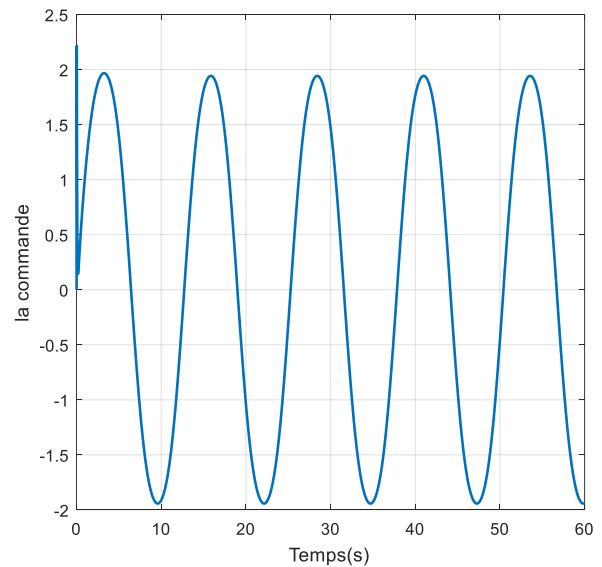
c. L'erreur du système

Figure 1. 22: Les réponses du système par la commande PID pour un entrée échelon.

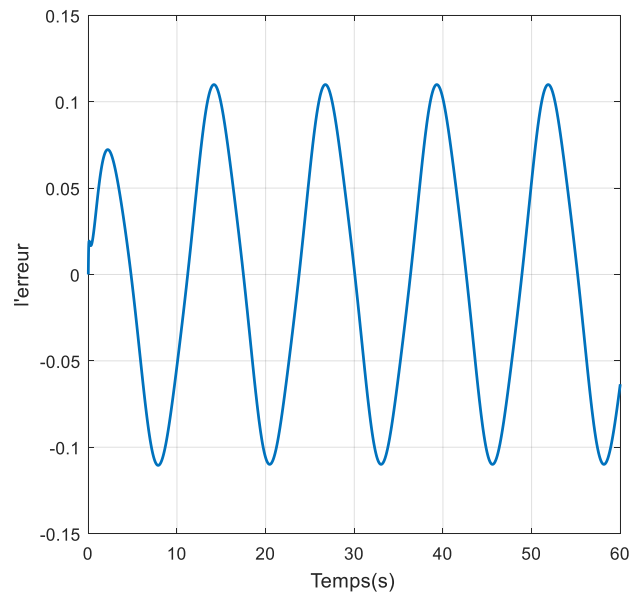
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale représentées par la figure 1.21:



a. La sortie du système



b. La commande du système



c. L'erreur du système

Figure 1. 23: Les réponses du système en BF pour une entrée sinusoïdale.

1.17.3 Interprétation les résultats de simulation

A partir de ces figures, nous pouvons observer que les erreurs de régulation et de poursuite sont faibles. De plus, la valeur du dépassement est également réduite.

En outre, les signaux de la commande présentent une certaine régularité et sont relativement lisses.

1.18 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une brève historique sur la robotique, nous avons aussi défini le robot. Puis, nous avons donné les classifications des robots, leurs caractéristiques,

leurs constituants et leurs espaces relatifs. Puis, nous avons abordé plusieurs modèles pour décrire les mouvements articulés d'un bras manipulateur à 1ddl. Nous avons ensuite procédé à une simulation en boucle ouverte d'un bras manipulateur et constaté que notre système était instable. Afin de remédier à cela, nous avons opté pour l'utilisation de la commande PID.

Dans le chapitre suivant on va faire une technique de commande par mode glissant sera introduite.

CHAPITRE 2:

Commande par mode glissant d'un bras manipulateur

2.1 Introduction

La commande par mode glissant est une méthode de commande avancée largement utilisée dans le domaine de la robotique pour contrôler les mouvements d'un bras manipulateur. Elle offre une approche robuste et performante pour assurer un contrôle précis et dynamique du système.

L'objectif principal de la commande par mode glissant est de maintenir le système dans un état de glissement contrôlé, où il suit une trajectoire souhaitée malgré les perturbations et les incertitudes. Contrairement aux méthodes de commande traditionnelles, la commande par mode glissant ne dépend pas d'un modèle précis du système, ce qui la rend plus adaptable et résistante aux variations et aux perturbations externes[45].

La commande par mode glissant utilise des lois de commande non linéaires qui génèrent une dynamique de glissement dans le système. Cette dynamique de glissement permet d'atteindre rapidement et de maintenir une trajectoire de référence, en minimisant les écarts entre la sortie réelle du système et la consigne .

En plus de sa robustesse, la commande par mode glissant offre d'autres avantages tels qu'une bonne rejettabilité des perturbations, une précision de suivi de trajectoire élevée et une tolérance aux variations des paramètres du système. Cependant, elle peut présenter certaines limitations, notamment le phénomène de chattering, qui correspond à des commutations rapides et répétitives des signaux de commande, pouvant affecter la durée de vie des actionneurs.

2.2 Système à structure variable

Lorsqu'un système ou un correcteur utilise de manière discontinue deux ou plusieurs expressions, on parle de système à structures variables. Cela se traduit par un système dont la structure évolue pendant son fonctionnement, grâce à la sélection d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de passer d'une structure à une autre à tout moment. De plus, un tel système peut présenter de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure individuelle[46].

Lorsqu'on utilise la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est dirigée vers une surface spécifique. Ensuite, grâce à la loi de commutation, elle est contrainte de rester à proximité de cette surface. Cette surface est appelée surface de glissement et le mouvement le long de cette surface est appelé mouvement de glissement[47].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence (MC) : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG) : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x, y) = 0$.
- Le mode du régime permanent (MRP) : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande[48].

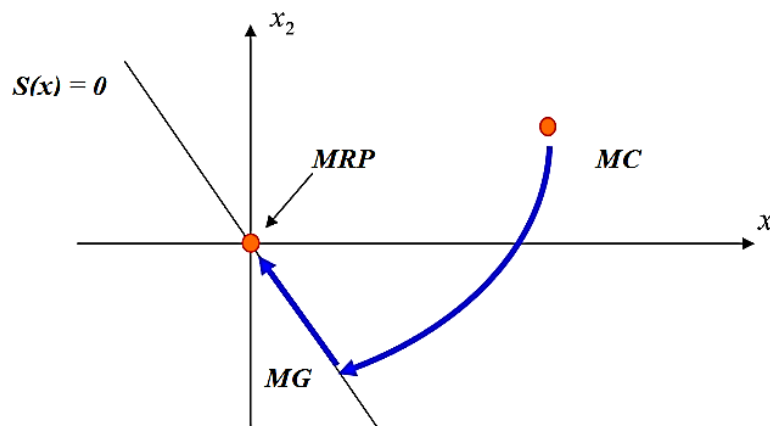


Figure II. 1: Différents mode pour la trajectoire dans le plan de Phase.

2.3 La commande par mode glissant

La commande par mode glissant présente de nombreux avantages significatifs, tels qu'une haute précision, une bonne stabilité, une simplicité de mise en œuvre, une invariance et une robustesse élevées. Ces avantages en font une méthode adaptée aux systèmes dont le modèle est imprécis. Dans cette approche, le contrôleur est composé de deux parties distinctes : une partie continue qui représente la dynamique du système pendant le mode de glissement, et une partie discontinue qui représente la dynamique du système pendant le mode de convergence[49].

Cette dernière partie est essentielle dans les systèmes de commande non linéaires, car elle permet de compenser les effets de l'imprécision et des perturbations sur le modèle. La conception de la commande par mode glissant peut-être réalisée en trois étapes principales indépendantes les unes des autres :

- Le choix de la surface de glissement.
- L'établissement des conditions d'existence du mode glissant.
- La détermination de la loi de commande appropriée[50].

2.4 Choix de la surface de glissement

La conception du SMC (Sliding Mode Control) peut être réalisée en deux phases. La première phase consiste à déterminer la surface de commutation. Dans les applications d'ingénierie, on utilise généralement l'erreur entre les objectifs de contrôle et les entrées de référence, ainsi que sa dérivée, pour former la surface de glissement[50].

La deuxième phase consiste à concevoir la loi de commande de manière à guider la trajectoire du système vers la surface de glissement. Une surface de glissement bien définie a été proposée par Slotine comme :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \tag{2.1}$$

Avec :

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

λ : est une constante positive.

r : est un degré relatif, il présente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

Le polynôme caractéristique de cette surface doit avoir des pôles réels négatifs multiples. Cette caractéristique rend cette surface particulièrement pratique car elle nécessite moins de paramètres de réglage lors de la synthèse du système. Par exemple, la surface de glissement est définie par :

$$S(x) = e(x) \quad \text{si } r = 1; \tag{2.2}$$

$$S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x) \quad \text{si } r = 2; \tag{2.3}$$

$$S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) \quad \text{si } r = 3. \tag{2.4}$$

L'équation différentielle linéaire autonome $S(x) = 0$ est une équation dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro. Elle possède une unique solution pour un choix approprié du paramètre λ_x qui assure à la fois une attractivité très élevée et le maintien du système sur la surface de glissement. C'est l'objectif de la commande dans ce contexte [45].

2.5 Conditions d'existence et de convergence

On représente la convergence du système par le mode de glissement d'après la figure suivante :

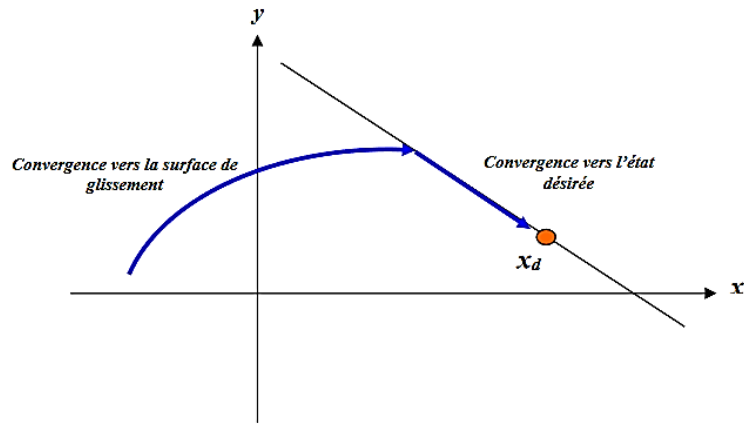


Figure 2. 1: Convergence du système glissant.

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types de conditions[50].

2.5.1 La condition directe de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée sous la forme [51]:

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \tag{2.5}$$

2.5.2 Fonction de LYAPUNOV

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$ [52].

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit:

$$V(X) = \frac{1}{2} S^2(X) \tag{2.6}$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(X) = S(X) \cdot \dot{S}(X) \tag{2.7}$$

La loi de la commande doit faire décroître cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$). L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et concevoir une commande " U " tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov.

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. D'où la condition de convergence exprimée par :

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0 \tag{2.8}$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande comme l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [53].

2.6 La détermination de la loi de commande

Une fois que le régime de glissement est atteint, la dynamique du système devient indépendante de la loi de commande, dont le rôle est de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface). C'est pourquoi la détermination de la surface de glissement se fait de manière indépendante de la commande. À présent, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire de l'état vers la surface, puis vers son point d'équilibre, tout en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement[54].

L'obtention d'un régime de glissement implique l'utilisation d'une commande discontinue. La surface de glissement doit être attractive des deux côtés. Par conséquent, bien que cette commande discontinue soit nécessaire, il est possible d'y ajouter une partie continue.

En effet, cette partie continue permet de réduire autant que souhaité l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a principalement pour rôle de vérifier les conditions d'attractivité. Ainsi, la structure d'un contrôleur basé sur le mode de glissement se compose de deux parties : une partie qui assure la linéarisation exacte u_{eq} et une autre partie stabilisante u_n [55].

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{eq} + \mathbf{u}_n \tag{2. 9}$$

Avec:

u_{eq} : la commande proposer par FILIPOV, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$.

u_n : est déterminer pour vérifie la condition de convergence.

La commande équivalente est déduire en considérant que la dérivée de surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$ elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signale de commande appliqué sur le système à commander, elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{max} et u_{min} .

2.6.1 La commande équivalente

La dynamique glissante émerge grâce à l'action du champ équivalent, qui est généré par la commande, également appelée commande équivalente, et qui maintient la surface de glissement inchangée. Cette condition d'invariance a été formulée en utilisant les concepts de la géométrie différentielle[56].

On considère des systèmes de type :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}(\mathbf{x})\mathbf{u} \tag{2. 10}$$

Avec $b = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ un champ de vecteurs définissant les gains de commande et $u \in \mathfrak{R}$ une loi de commande vérifiant:

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Selon cette loi, le système présente un régime glissant caractérisé par la dynamique équivalente:

$$f_{eq}(x) = f(x) + b(x)u_{eq} \quad (2.12)$$

Dans laquelle, u_{eq} est la commande équivalente qui rend la surface de glissement S invariante et vérifie, pour, $x \in S$, l'inégalité:

$$\min(u^-(x), u^+(x)) < u_{eq} < \max(u^-(x), u^+(x)) \quad (2.13)$$

En notant :

$$u_{min} = \min(u^-(x), u^+(x)) \text{ et } u_{max} = \max(u^-(x), u^+(x)) \quad (2.14)$$

On peut interpréter u_{eq} comme étant la valeur moyenne de $u(t)$ lors de la commutation rapide entre u_{max} et u_{min} .

La commande équivalente correspond au régime glissant idéal (ni seuil, ni retard, ni hystérésis), c'est-à-dire pour lequel le glissement est décrit en utilisant la condition d'invariance :

$$S(x) = 0 \quad \text{et} \quad \dot{S}(x) = 0 \quad (2.15)$$

Il vient en développant les calculs :

$$\dot{S} = \langle \nabla S, f \rangle = 0 \quad (2.16)$$

D'où :

$$u_{eq} = -\frac{\langle \nabla S, f \rangle}{\langle \nabla S, b \rangle} \quad (2.17)$$

Avec la condition d'existence :

$$\langle \nabla S, b \rangle \neq 0 \quad (2.18)$$

En portant l'expression de u_{eq} dans (2.14), on obtient l'équation du régime glissant idéal (solution de ((2.14), (2.15)) sur la surface $S = 0$) :

$$\dot{x} = f(x) + b(x)u_{eq} = [I - b(x)(\langle \nabla S, b(x) \rangle)^{-1} \cdot (\nabla S)]f(x) \quad (2.19)$$

La commande équivalente est interprétée physiquement comme étant une fonction continue représentant la moyenne des commutations successives de "u" entre "u_{max}" et "u_{min}" d'où la condition :

$$u_{min} \leq u_{eq} \leq u_{max} \tag{2.20}$$

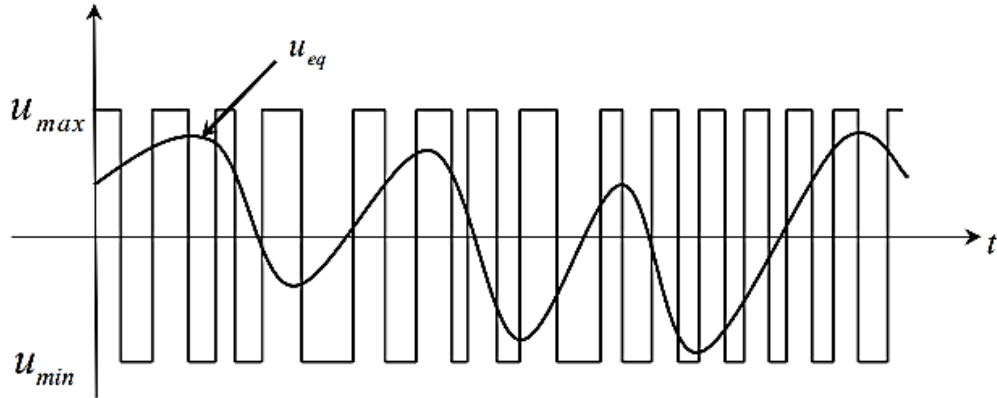


Figure 2. 2: la commande équivalente u_{eq} [ref].

2.6.2 Commande attractive

Il existe différentes formes de la commande attractive :

3.6.2.1 La commande signe

Plusieurs choix pour la commande discontinuente peuvent être faits. Le plus simple consiste à exprimer la commande discontinue $u_n = [u_1, u_2, \dots, u_m]$ avec la fonction signe par rapport à $S = [S_1, S_2, \dots, S_m]$ est :

$$sign(S(x, t)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \tag{2.21}$$

u_n : S'exprime donc comme :

$$u_n = K \cdot sign(S) \tag{2.22}$$

Où K est un gain positif.

Ce premier choix de la fonction discontinue est représenté comme suivante :

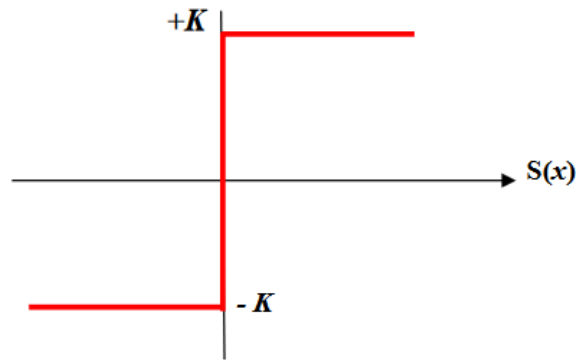


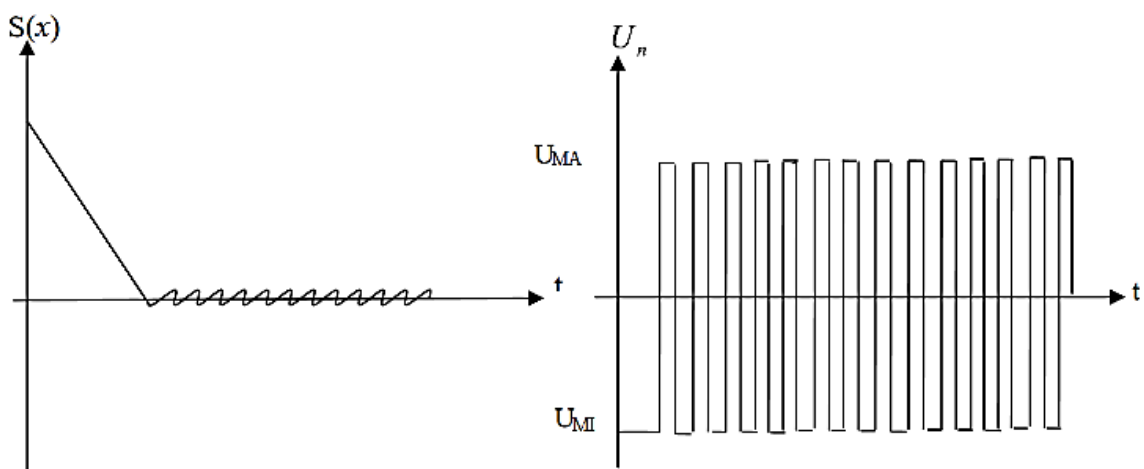
Figure 2. 3: Représentation de fonction « sign » de U_n .

Les valeurs $\pm K$ avec une fréquence théoriquement infinie et se manifeste par des oscillations autour de la surface de glissement S , ces derniers auront une amplitude d'autant plus grande et une fréquence d'autant plus basse que les imperfections sont importantes[57].

Lorsque l'on considère une fréquence d'oscillation infinie, cela suppose l'utilisation d'éléments de commutation idéaux tels que des relais sans seuil, sans hystérésis et sans retard de commutation. Cependant, dans la pratique, ces conditions idéales ne sont pas satisfaites, ce qui entraîne un phénomène connu sous le nom de broutement (chattering en anglais). Ce phénomène peut être préjudiciable et potentiellement causer des dommages aux équipements des systèmes[57].

Afin de remédier à ce problème, qui peut avoir des conséquences dévastatrices, la fonction discontinue "sgn" est remplacée par des fonctions continues.

Cela se fait en créant une bande autour de la surface de glissement S . Cette approche permet de réduire les effets du broutement en introduisant une zone de tolérance où le contrôle est considéré comme étant sur la surface de glissement, évitant ainsi les changements de commutation constants[56].



Surface $S(x)$

$$u_n = -K \text{sign}(S(x))$$

Figure 2. 4: Surface de glissement et la commande discontinue[50].

Dans l'objectif de minimiser les oscillations indésirables à haute fréquence dans les réponses, nous allons présenter quelques approches classiques qui consiste à imposer la variation de la valeur de la commande (commande u_{eq}) en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement. Certaines de ces méthodes permettent d'introduire une commande continue dans une plage spécifique de la surface[58].

2.6.2.2 Commande continue dans une bande de la surface

La proposition de Slotine consiste à remplacer la loi de commande discontinue par une loi de commande continue en utilisant la variable x en dehors d'une fine bande située près de la surface de glissement. La discontinuité de la commande est maintenue en dehors de cette bande. On choisit pour la composante haute fréquence :

$$\Delta u_i = -K \text{sat} \left(\frac{S_i}{\phi_i} \right) \tag{2.23}$$

$$\text{Si } \left| \frac{S_i}{\phi_i} \right| \leq 1 \text{ alors } \text{sat} \left(\frac{S_i}{\phi_i} \right) = \left(\frac{S_i}{\phi_i} \right) \text{ et } u_i = u_{ieq} - K_i \frac{S_i}{\phi_i} \tag{2.24}$$

$$\text{Si } \left| \frac{S_i}{\phi_i} \right| > 1 \text{ alors } \text{sat} \left(\frac{S_i}{\phi_i} \right) = \text{sign}(S_i) \text{ et } u_i = u_{ieq} - K_i \text{sign}(S_i) \tag{2.25}$$

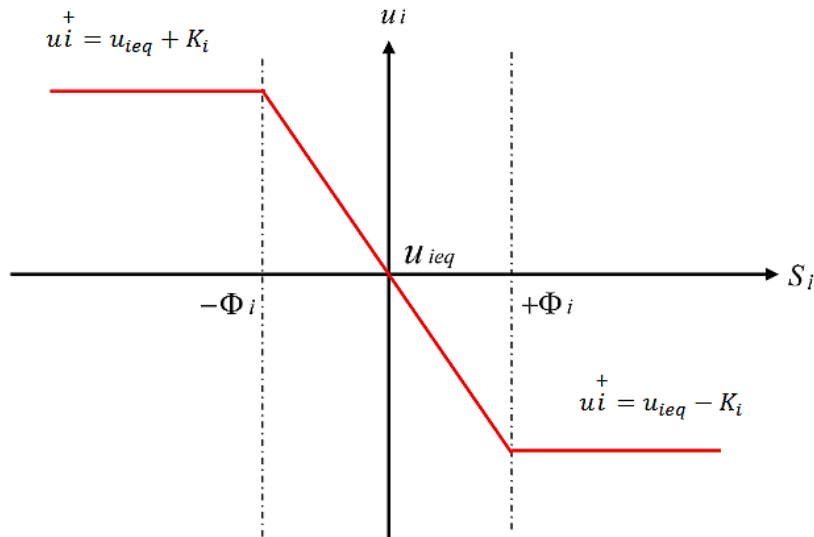


Figure 2. 5: Loi de commande par bande continue au voisinage de la surface de glissement selon Slotine.

2.7 Le phénomène de chattering

Pendant le régime glissant, les discontinuités générées par la commande peuvent provoquer des oscillations à haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement, ce phénomène est connu sous le nom de "broutement", "réticence" ou "chattering" en anglais.

Ce broutement est le principal inconvénient de la commande par mode glissant d'ordre un, car il peut exciter des dynamiques non prises en compte dans le modèle et conduire à l'instabilité du système[59].

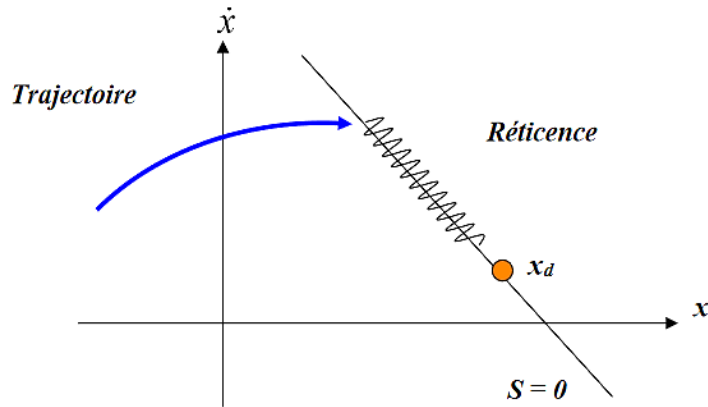


Figure 2. 6: Phénomène de chattering.

De nombreuses études ont été réalisées afin de réduire ou d'éliminer le phénomène de chattering. Parmi celles-ci, l'utilisation de fonctions sigmoïdes telles que la tangente hyperbolique, la tangente réciproque ou la saturation a été explorée. Ces fonctions sont utilisées pour adoucir les transitions entre les états de la commande, réduisant ainsi les variations brusques et les oscillations à haute fréquence[59].

2.8 Réduction du phénomène de chattering

Afin de réduire ou d'éliminer le phénomène de chattering, différentes solutions ont été développées. Dans cette section, nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement :

- Remplacer la fonction $sign(s)$ par une fonction $sat(s)$, Alors la composante discontinue dévient:

$$u_{glis} = -ksat(s) \tag{2. 26}$$

$$sat(s) = \begin{cases} \frac{s}{\phi} & si \quad |s| \leq \phi \\ sign(s) & si \quad |s| > \phi \end{cases} \tag{2. 27}$$

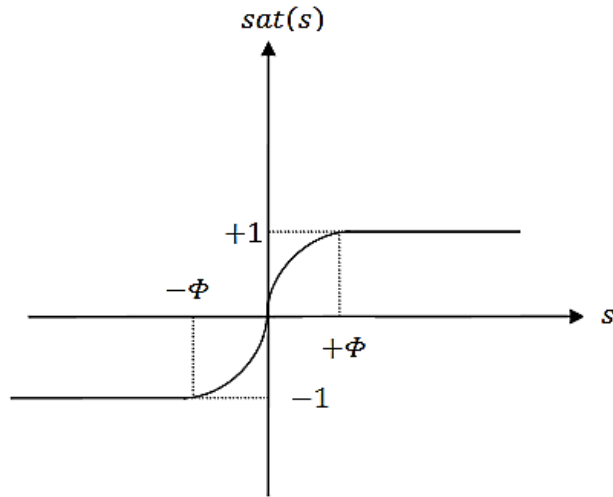


Figure 2. 7: Fonction de saturation sat.

- Remplacer la fonction $sign(s)$ par une fonction $cont(s)$, la composante discontinue

$$u_{glis} = -kcont(s) \quad (2.28)$$

$$cont(s) = \begin{cases} \frac{s}{|s|+\delta} & si \quad |s| \leq \phi \\ sign(s) & si \quad |s| > \phi \end{cases} \quad avec \delta > 0 \quad (2.29)$$

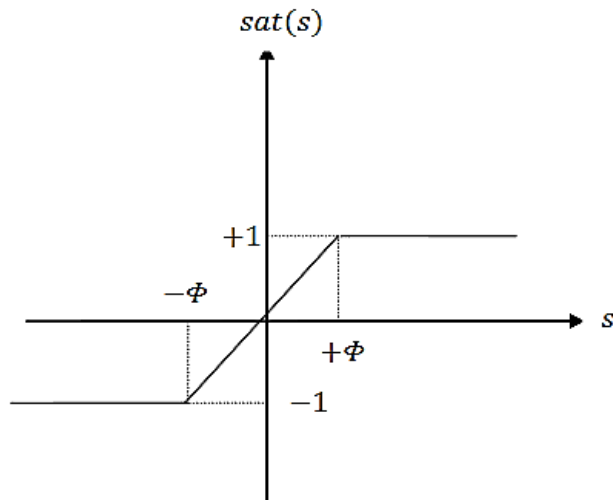


Figure 2. 8: Fonction de saturation cont.

2.9 Domaine d'application du réglage par mode glissement

La méthode de réglage par mode glissement a connu d'importants développements dans divers domaines de la commande, tels que la commande des systèmes hydrauliques ou pneumatiques ainsi que la robotique. Dans ces applications, il existe des vannes fonctionnant en mode tout ou rien, c'est-à-dire qu'elles n'ont que deux états stables : complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces vannes sont capables de commuter à des fréquences d'environ 10 Hz [60].

Dans le cas des entraînements électriques utilisés dans les machines-outils ou les robots, où il est nécessaire de régler la vitesse de rotation ou la position, la technique de réglage par mode glissant présente des avantages indéniables. Elle permet d'obtenir un comportement dynamique de haute performance et facilite le contrôle précis de certaines grandeurs telles que le courant et la vitesse de rotation. Ces avantages font du réglage par mode glissant un choix favorable dans ces applications[60].

2.10 Application de la commande par mode de glissement au bras manipulateur

2.10.1 Principe de fonctionnement

On a:

$$\ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin(q) + \frac{1}{ml^2} u \quad (2.30)$$

On pose :

$$x_1 = q \quad \text{et} \quad x_2 = \dot{q}$$

Donc :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{q} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{q} = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + \frac{1}{ml^2} u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.31)$$

Alors :

$$y = x_1 \quad (2.32)$$

$$y^{(1)} = \dot{x}_1 = x_2 \quad (2.33)$$

$$y^{(2)} = \dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + \frac{1}{ml^2} u \quad (2.34)$$

Avec $r = 2$, alors la surface donnée par :

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e \quad (2.35)$$

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (2.36)$$

L'expression de l'erreur est :

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (2.37)$$

Les dérivés de l'erreur :

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (2.38)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (2.39)$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_2 \quad (2.40)$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u \quad (2.41)$$

Donc :

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \quad \text{et} \quad \dot{s} = -k \text{sign}(s) \quad (2.42)$$

$$\dot{s} = \ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u + \lambda(\dot{x}_{1d} - x_2) = -k \text{sign}(s) \quad (2.43)$$

Voici la description de la loi de commande :

$$u = ml^2(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u + \lambda(\dot{x}_{1d} - x_2) + k \text{sign}(s)) \quad (2.44)$$

2.10.2 Présentations et interprétations des résultats de simulation

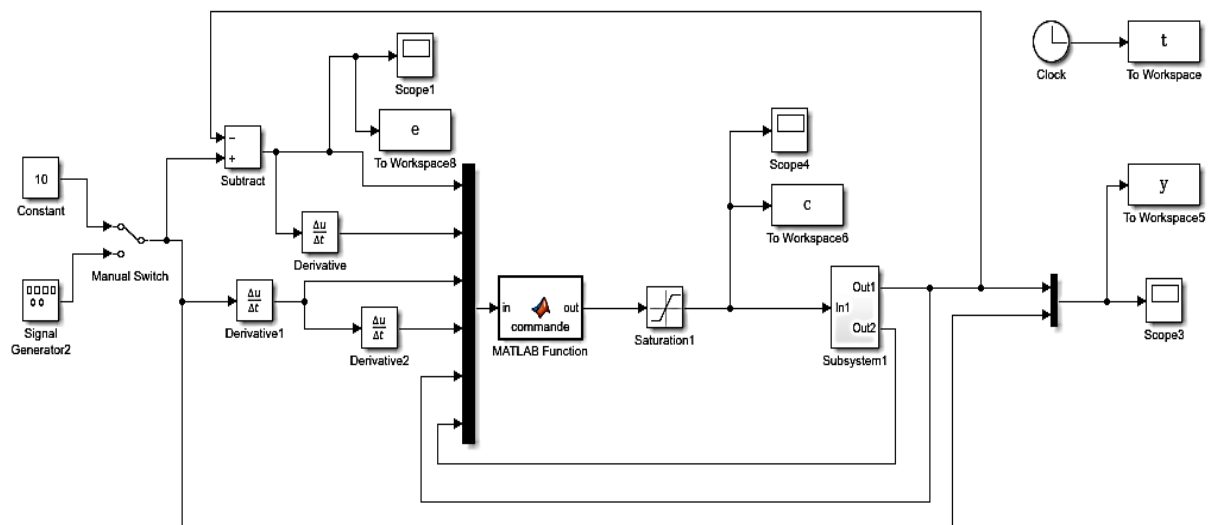


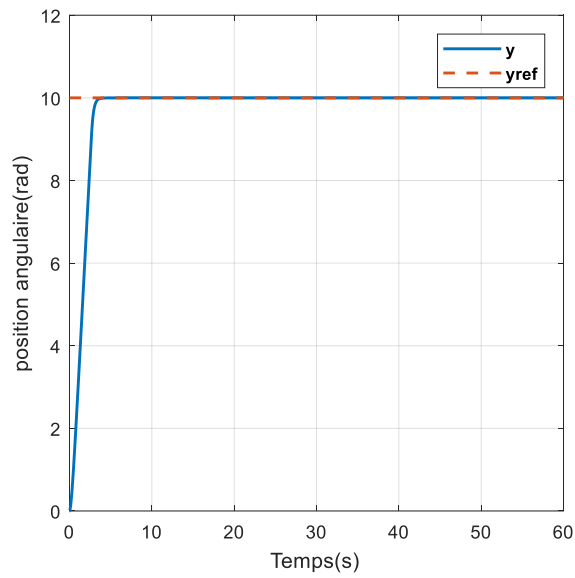
Figure 2. 9: structure de la commande par mode glissant.

2.10.3 Résultats de simulation

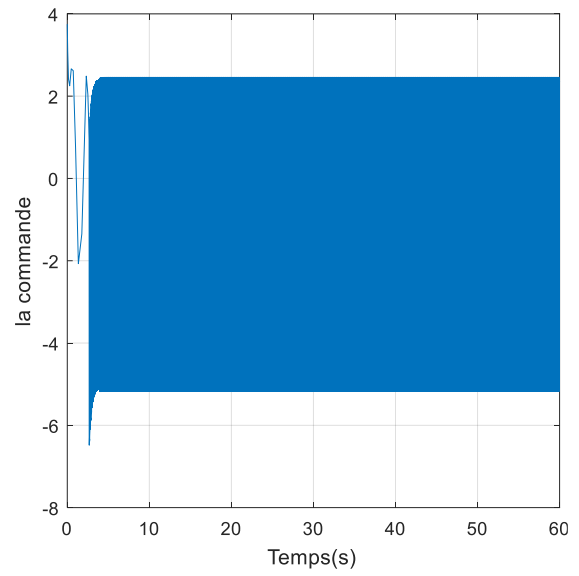
Pour les paramètres de synthèse nous avons pris :

$$m = 0.25 \text{ kg} ; l = 1 \text{ m} ; g = 10 \text{ m/s}^2 ; t = 60 \text{ sec}$$

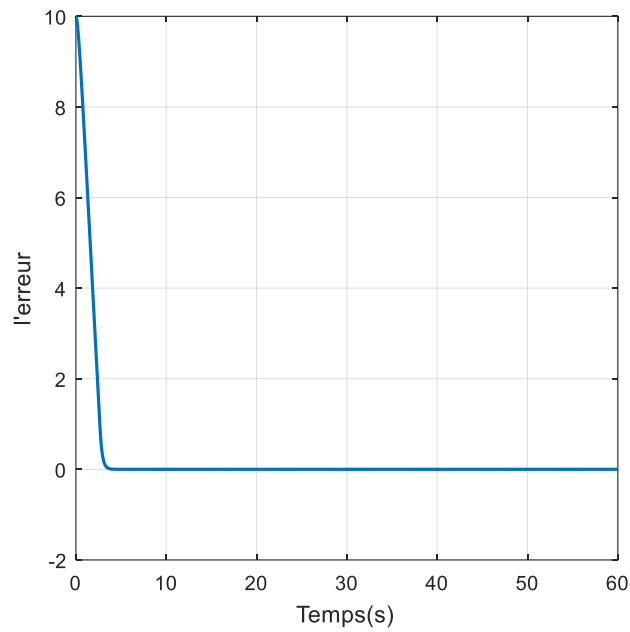
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence échelon d'amplitude 10 sont représentées par la figure 2.11 :



a. La sortie du système



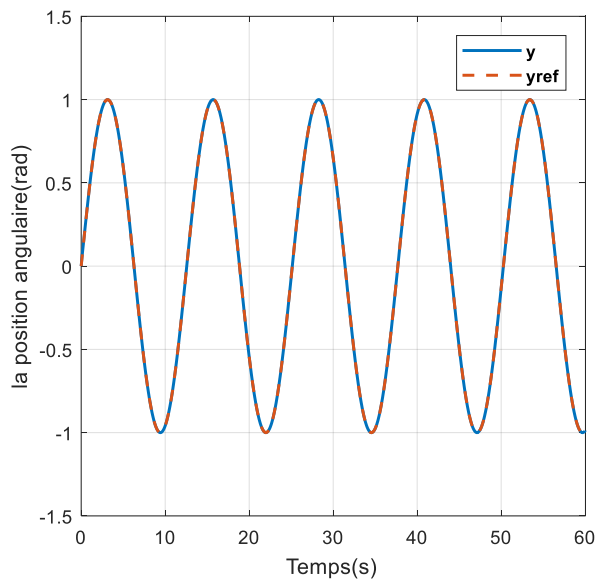
b. la commande du système



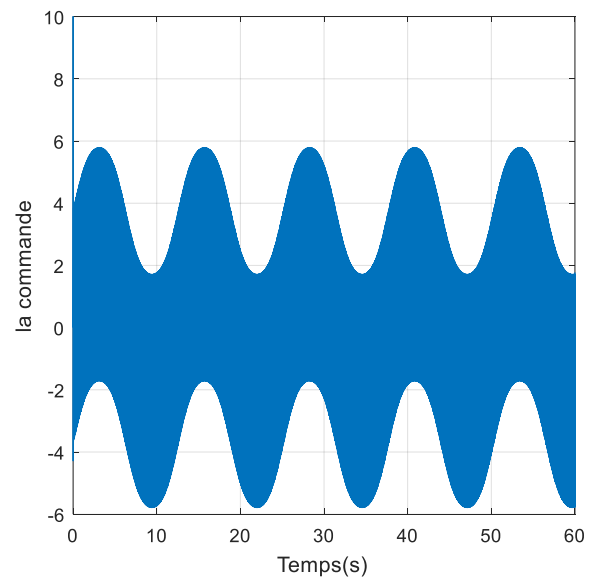
c. l'erreur du système.

Figure 2. 10: Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée échelon.

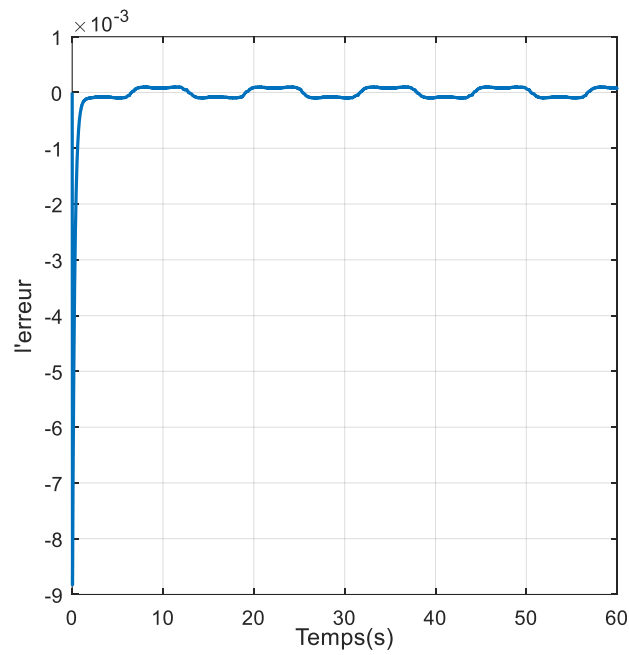
Les résultats de la position, la commande et l'erreur pour une référence sinusoïdale sont représentées par la figure 2.10:



a. La sortie du système



b. la commande du système



c. l'erreur du système.

Figure 2. 11: Résultats de simulation de la commande par mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.

2.10.4 Interprétation les résultats de simulation

Les résultats obtenus démontrent que la technique de commande par modes glissants présente de bonnes performances pour le contrôle de notre système. Elle se distingue par un temps de réponse rapide, une précision élevée en régime permanent.

Comparativement à la technique PID, la commande par modes glissants offre des avantages significatifs dans ces aspects de performance.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts généraux de la commande par mode de glissement, une approche largement utilisée dans les systèmes non linéaires. L'un des principaux avantages de cette approche réside dans sa simplicité de mise en œuvre grâce à ses lois de commande, nous avons appliqué cette commande à un bras manipulateur à un degré de liberté et nous avons présenté des illustrations de simulation qui montrent L'utilisation de la commande par mode glissant permet d'obtenir une trajectoire de contrôle fluide et stable en maintenant les conditions de glissement. Cependant, il convient de prendre en compte certains aspects tels que la limitation du phénomène de chattering, qui peut affecter la performance du système. On propose dans le chapitre suivant, d'utiliser notre technique de commande par Backstepping.

CHAPITRE 3:

Commande par backstepping d'un bras manipulateur

3.1 Introduction

Le backstepping est une approche systématique et récursive pour la conception de lois de commande non linéaires en utilisant des fonctions de Lyapunov afin d'assurer progressivement la stabilisation de chaque étape de la conception. À chaque étape, une commande virtuelle est générée pour conduire le système vers son état d'équilibre. Cette technique permet de synthétiser des lois de commande tout en prenant en compte les perturbations éventuelles et les incertitudes sur les paramètres du système [5].

L'idée fondamentale de la commande par backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade, tout en garantissant leur stabilité selon les critères de Lyapunov. Cette approche confère au système des propriétés de robustesse et de stabilité globale asymptotique.

Une des particularités du backstepping est qu'il évite la nécessité de modèles bien définis, contrairement à la méthode de linéarisation entrée-sortie qui souvent supprime des non-linéarités utiles. Cette méthode offre une variété d'outils de synthèse qui permettent de traiter les incertitudes et de préserver les non-linéarités bénéfiques pour la performance et la robustesse de la commande[5].

3.2 Méthodes de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaires peut être abordée selon deux approches différentes. La première approche vise à linéariser le système à commander, tandis que la deuxième approche consiste à trouver une fonction de Lyapunov qui garantit certaines performances pour le système en boucle fermée.

La première méthode, bien qu'elle soit limitée en importance, permet d'étudier la stabilité locale du système, mais ne fournit pas d'informations sur le domaine de stabilité global. La deuxième méthode repose sur le concept d'énergie dans un système. Son principe consiste à analyser la stabilité du système en utilisant une fonction de Lyapunov, qui mesure l'énergie potentielle du système.

Cette deuxième méthode offre l'avantage d'analyser la stabilité du système de manière globale, en fournissant des informations sur le domaine de stabilité global. Elle permet d'évaluer les performances du système en boucle fermée et d'assurer une stabilité robuste[60].

3.3 Principe de l'approche du Backstepping

L'idée de base du backstepping est de commencer par stabiliser le premier sous-système à l'aide d'une fonction stabilisante connue, utilisant une fonction de Lyapunov spécifique. Ensuite, un intégrateur est ajouté à son entrée. Cette procédure est répétée pour chaque sous-

système augmenté, progressant ainsi successivement jusqu'à atteindre une fonction de Lyapunov globale qui définit la loi de commande globale permettant de stabiliser l'ensemble du système[61].

3.4 Les avantages et les inconvénients de la commande par Backstepping

3.4.1 les avantages

Comme avantages la commande Backstepping assure :

- Simplicité dans la démarche de la conception d'une telle commande.
- Utilisable en non linéaire.
- Suivi de consigne avec rejet de perturbation de manière satisfaisante.
- Assure la stabilité du système commandé, (elle est basée sur la théorie de Lyapunov) [62].

3.4.2 Les inconvénients

L'utilisation de la technique de Backstepping pour la commande non linéaire d'un système d'ordre n , peut provoquer des difficultés qui présentent des obstacles pour les convergences des grandeurs du système, parmi ces difficultés les principaux problèmes posés par la commande par Backstepping sont :

- Le choix des gains
- Le grand problème de cette technique de commande non linéaire, c'est le choix des gains positives pour obtenir la convergence de la majorité des grandeurs de système au même temps, par ce que le choix de certain gain améliorera convergence de certaine grandeur et perturbé les convergences des autres grandeurs. Ce qui nécessite faire plusieurs essais pour le choix de ces gains, et plus l'ordre de système est supérieur plus le choix est difficile [63].
- L'algorithme de calcul
- Pour obtenir des bons résultats, il faut choisir par Précision de l'algorithme des pas précises de calcul après l'initialisation des valeurs de système[63].
- La limitation des valeurs de la commande
- Les saturations des grandeurs de la commande peu perturbé la convergence du système, il faut d'abord choisir des valeurs minimales des grandeurs de commande qui assurés la convergence[63].

3.5 Méthode générale de synthèse par Backstepping

Cette méthode s'applique aux systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que l'indique la représentation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (3.1)$$

Tel que :

$[x_1, x_2, \dots, x_n]^t$: vecteur d'état ($x \in \mathcal{R}^n$) ; ($u \in \mathcal{R}$).

Afin d'illustrer la procédure récursive de la méthode Backstepping, on considère que la sortie du système $y = x_1$ désire suivre le signal de référence y^* . Le système étant d'ordre n , la mise en œuvre s'effectue en n étapes.

Etape 1

On commence par la première équation du système (3.1), où x_2 sera considérée comme une commande virtuelle intermédiaire.

La première référence désirée est notée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 = y^* \quad (3.2)$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (3.3)$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 \quad (3.4)$$

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (3.5)$$

Pour un tel système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.6)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (3.7)$$

$$\dot{V}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (3.8)$$

Un choix judicieux de x_2 rendrait \dot{V}_1 négative et assurerait la stabilité pour la dynamique de (3.5). Pour cela, prenons $x_2 = \alpha_1$ telle que :

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 = -K_1 e_1 \quad (3.9)$$

K_1 : Gain positif.

Ainsi, la loi de commande pour le système (3.4) sera donnée par :

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad (3.10)$$

Ce qui implique

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.11)$$

Etape 2

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous-système précédent (3.4) :

$$(\mathbf{x}_2)^* = \boldsymbol{\alpha}_1 \quad (3.12)$$

D'où l'erreur de régulation

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \boldsymbol{\alpha}_1 \quad (3.13)$$

Sa dérivée est

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 \quad (3.14)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_3 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 \quad (3.15)$$

Pour le système (3.12), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \mathbf{e}_2^2 \quad (3.16)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} [\mathbf{e}_1^2 + \mathbf{e}_2^2] \quad (3.17)$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \mathbf{e}_2 \dot{\mathbf{e}}_2 \quad (3.18)$$

$$\dot{V}_2 = -K_1 \mathbf{e}_1^2 + \mathbf{e}_2 [\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_3 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1] \quad (3.19)$$

Pour la stabilité de système dynamiquement choisie $\mathbf{x}_3 = \boldsymbol{\alpha}_2$, telle que :

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_3 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 = -K_1 \mathbf{e}_1 \quad (3.20)$$

Où $K_1 > 0$ est une constante de conception.

$$\boldsymbol{\alpha}_2 = \frac{1}{g_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)} [-K_2 \mathbf{e}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)] \quad (3.21)$$

Avec :

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 = \frac{g_0 \mathbf{x}_1 [-K_2 \dot{\mathbf{e}}_2 - \ddot{\boldsymbol{\alpha}}_0 - \dot{\mathbf{f}}_1(\mathbf{x}_1) - [-K_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\boldsymbol{\alpha}}_0 - \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1)] \dot{\mathbf{g}}_1(\mathbf{x}_1)]}{g_0^2(\mathbf{x}_1)} \quad (3.22)$$

Ce choix implique que :

$$\dot{v}_2 = -K_1 \mathbf{e}_1^2 - K_2 \mathbf{e}_2^2 \leq 0 \quad (3.23)$$

Etape n :

De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$(\mathbf{x}_n) = \boldsymbol{\alpha}_{n-1} \quad (3.24)$$

On l'erreur de régulation :

$$e_n = x_n - \alpha_n - 1 \quad (3.25)$$

La dérivée est :

$$\dot{e}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_n - 1 \quad (3.26)$$

La fonction de Lyapunov étendue est :

$$v_n = v_1 + v_2 + \dots + \frac{1}{2}e_n^2 \quad (3.27)$$

$$v_n = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2] \quad (3.28)$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{v}_n = \dot{v}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n \quad (3.29)$$

$$\dot{v}_n = -K_1 e_1^2 + -K_1 e_2^2 + \dots + e_n [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1}] \quad (3.30)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier.

Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} = -K_n e_n \quad (3.31)$$

Où $K_n > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)} [-K_n e_n - \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n)] \quad (3.32)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{v}_n = -K_1 e_1^2 - K_1 e_2^2 \dots - K_1 e_n^2 \leq 0 \quad (3.33)$$

3.6 Application de la commande par backstepping au bras manipulateur

Etape 1 :

$$e = x_1 - x_{1d} \quad (3.34)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{x}_{1d} \quad (3.35)$$

La fonction de Lyapunov est donnée par :

$$v(e) = \frac{1}{2}e^2 \quad (3.36)$$

$$\dot{v}(e) = e\dot{e} = e(x_2 - \dot{x}_{1d}) \quad (3.37)$$

$$x_2 - \dot{x}_{1d} = -\alpha_1 e \quad (3.38)$$

α_1 : constante positive.

$$\dot{v}(e) = -\alpha e^2 < 0 \quad (3.39)$$

$$-\alpha_1 e = x_2 - \dot{x}_{1d} \quad (3.40)$$

$$x_2 = -\alpha_1 e + \dot{x}_{1d} = \phi_1(x) \quad (3.41)$$

Avec $\phi_1(x)$: commande virtuelle.

Changement de variable

$$z_1 = x_2 - \phi_1(x) = x_2 + \alpha_1 e - \dot{x}_{1d} \quad (3.42)$$

Etape 2 :

La fonction de Lyapunov augmenté $v(e, z_1)$

$$v(e, z_1) = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} z_1^2 \quad (3.43)$$

$$\dot{v}(e, z_1) = e\dot{e} + z_1\dot{z}_1 \quad (3.44)$$

$$z_1 = x_2 - \phi_1(x) = x_2 + \alpha_1 e - \dot{x}_{1d} \quad (3.45)$$

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_2 + \alpha_1 \dot{e} - \ddot{x}_{1d} \quad (3.46)$$

$$\dot{v}(e, z_1) = e(x_2 - \dot{x}_{1d}) + z_1(\dot{x}_2 + \alpha_1 \dot{e} - \ddot{x}_{1d}) \quad (3.47)$$

$$\dot{v}(e, z_1) = e(x_2 - \dot{x}_{1d}) + z_1\left(-\frac{g}{l}\sin(x_1) + \frac{1}{ml^2}u + \alpha_1 \dot{e} - \ddot{x}_{1d}\right) \quad (3.48)$$

$$-\frac{g}{l}\sin(x_1) + \frac{1}{ml^2}u + \alpha_1 \dot{e} - \ddot{x}_{1d} = -\alpha_2 z_1 \quad (3.49)$$

$$u = ml^2 \left(-\alpha_2 z_1 + \frac{g}{l}\sin(x_1) - \alpha_1 \dot{e} + \ddot{x}_{1d} \right) \quad (3.50)$$

Voici la description de la loi de commande :

$$u = ml^2 \left(-\alpha_2(x_2 + \alpha_1 e - \dot{x}_{1d}) + \frac{g}{l}\sin(x_1) - \alpha_1 \dot{e} + \ddot{x}_{1d} \right) \quad (3.51)$$

3.7 Présentations des résultats de simulation

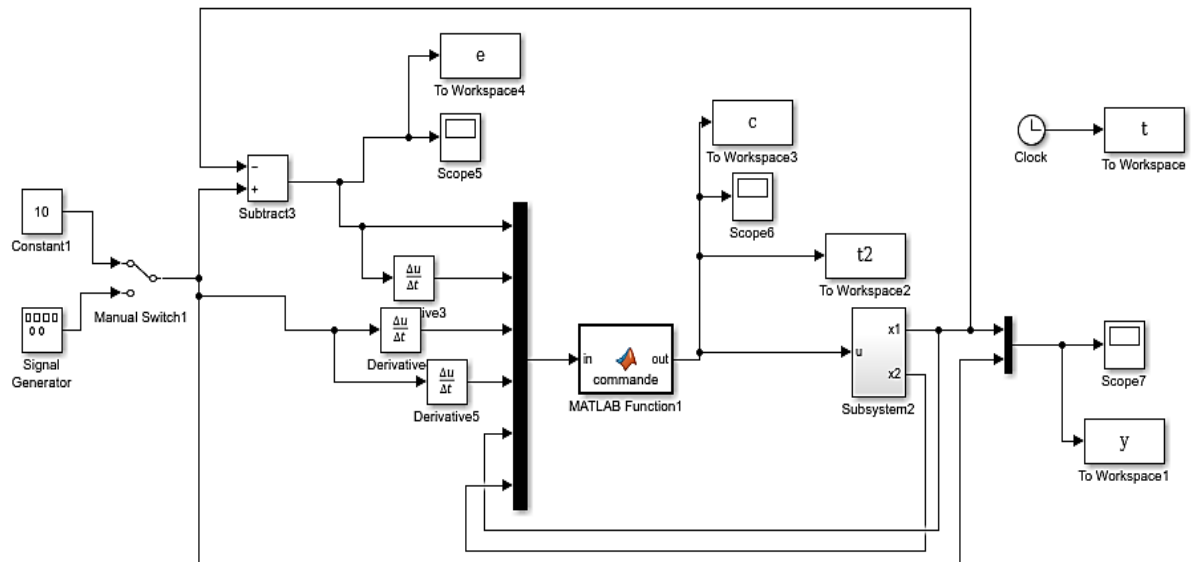
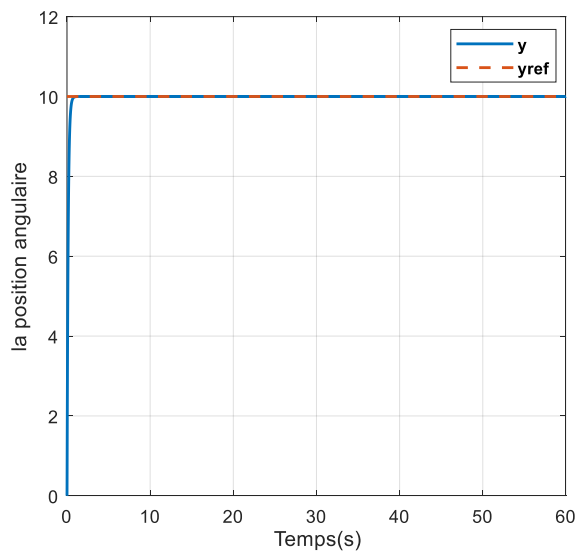
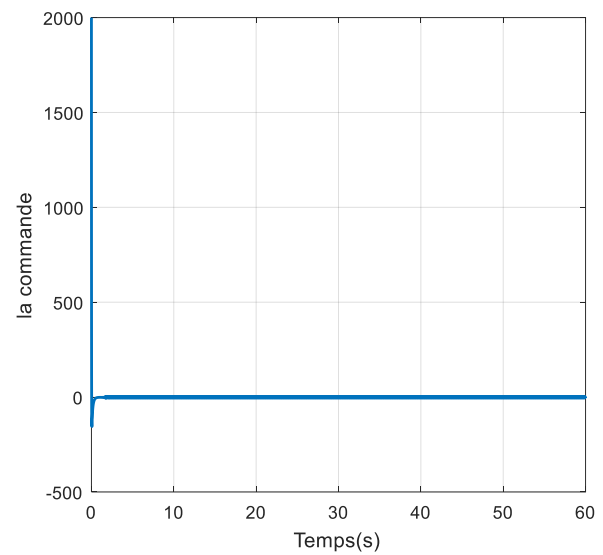


Figure 3. 1: Structure de la commande par backstepping.

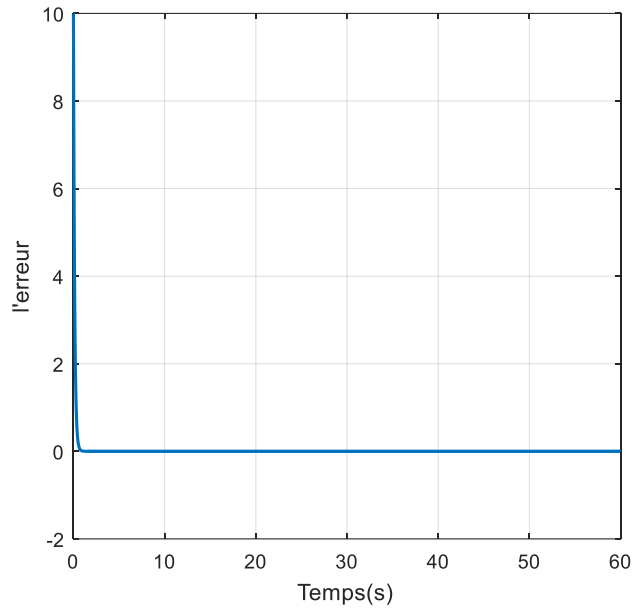
Les résultats obtenus pour une entrée échelon d'amplitude 10 sont :



a. La sortie du système.



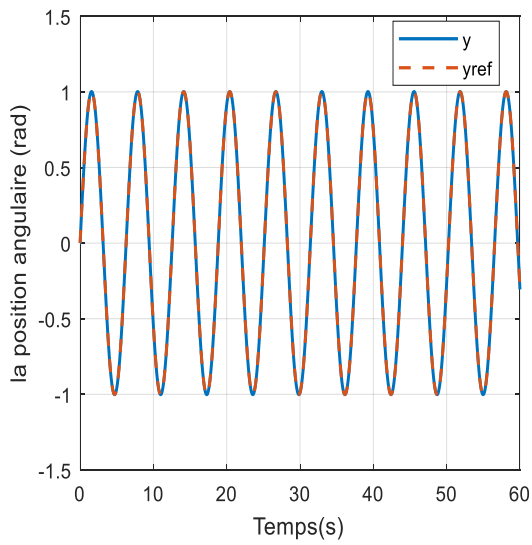
b. la commande du système.



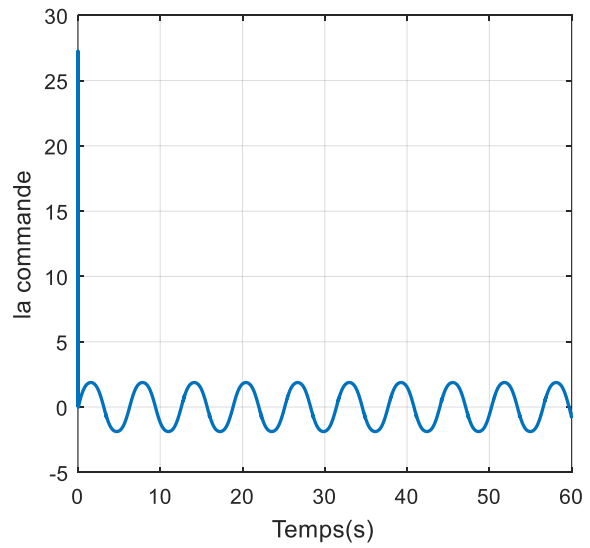
c. L'erreur du système.

Figure 3. 2: Les résultats de simulation de la commande par backstepping, pour une entrée échelon.

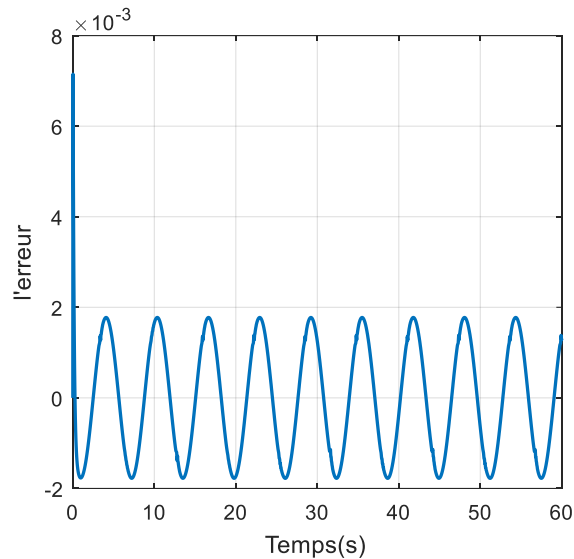
Les Résultats de simulation de la commande par backstepping, pour une entrée sinusoïdale sont :



a . La sortie du système.



b . La commande du système.



c . L'erreur du système.

Figure 3. 3: Résultats de simulation de la commande par backstepping, pour une entrée sinusoïdale.

3.8 Interprétation les résultats de simulation

Les résultats obtenus par la commande backstepping est parfaite. Cette commande garantit la stabilisation du système, de contrôler son mouvement de manière précise et robuste, et une amélioration notable en termes de suivi de trajectoire.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition de la stabilité au sens de Lyapunov, on se basant sur la commande par le Backstepping, qui est une méthode basée sur la méthode directe de Lyapunov. Nous avons constaté que la synthèse des lois de commande par cette technique récursive est systématique, et simple, tous en stabilisant notre système. Nous avons appliqué cette dernière sur un bras manipulateur à un degré de liberté. Cette commande est établie étape par étape tout en assurant la stabilité du bras par un choix convenable de la fonction de Lyapunov. Les résultats de simulation sont satisfaisants en termes de stabilité, de précision et de robustesse du contrôle. Le chapitre suivant on va faire une commande tolérante au défaut de ces commandes.

Chapitre4 :

Commande tolérante au défaut d'un bras manipulateur

4.1 Introduction

La tolérance active aux fautes dans les robots est devenue un domaine de recherche et développement crucial pour assurer la fiabilité et les performances des systèmes robotiques. Les robots sont souvent confrontés à des défauts, tels que des capteurs défectueux, des actionneurs défaillants ou des perturbations inattendues, qui peuvent compromettre leur fonctionnement normal. La tolérance active aux fautes vise à détecter, isoler et compenser ces défauts en temps réel, permettant ainsi au robot de continuer à fonctionner de manière fiable et efficace, même en présence de défauts.

Cette approche repose sur la mise en œuvre de techniques avancées de détection et de diagnostic des fautes, qui permettent d'identifier rapidement les défauts et d'en déterminer l'impact sur le système. Une fois les fautes détectées, des mécanismes de reconfiguration et des algorithmes de commande adaptatifs entrent en jeu pour compenser les défauts et ajuster les stratégies de contrôle en conséquence. Cela peut impliquer la redistribution des tâches entre les actionneurs, l'adaptation des trajectoires ou la modification des paramètres de commande.

L'objectif ultime de la tolérance active aux fautes dans les robots est de maintenir la fonctionnalité opérationnelle du robot tout en garantissant une performance optimale, même en présence de défauts. Cela permet d'améliorer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des systèmes robotiques, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines d'application.

4.2 Défaut

Un défaut est l'écart non autorisé qui peut être entre la valeur nominale et la valeur réelle d'une réponse d'un système[64].

4.3 Les Différents Types de Défauts

Comme le montre la figure 4.1, il existe trois types de défauts : défaut actionneur, défaut capteur et défaut système (ou défaut composant)[65].

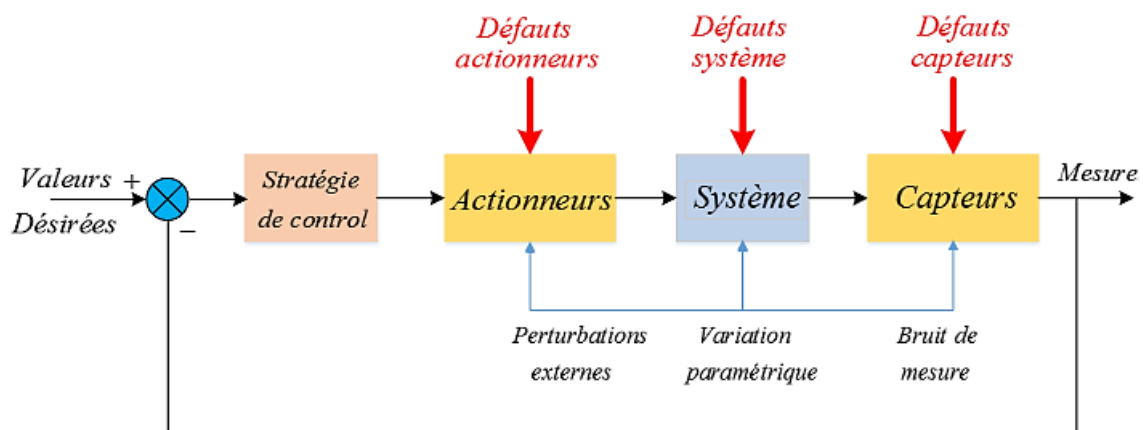


Figure 4. 1: Répartition des différents défauts d'un processus [65].

4.3.1 Défauts actionneurs

Un défaut d'actionneur fait référence à toute défaillance partielle ou totale d'un actionneur qui peut compromettre le signal d'entrée de la partie opérative. En cas de perte totale d'un actionneur, le système devient incontrôlable via cet actionneur qui reste bloqué dans une seule position, comme par exemple en cas de coupure du câble électrique. Une perte partielle d'un actionneur entraîne une dégradation de la contrôlabilité du système, comme dans les situations suivantes :

- Fuite hydraulique ou pneumatique dans un vérin.
- Chute de la tension d'alimentation ou perte de puissance dans une machine.

Augmenter le nombre d'actionneurs pour accroître la tolérance aux pannes est une solution inefficace en raison de leur taille importante et de leur coût élevé[66].

4.3.2 Défauts capteurs

Les capteurs sont des dispositifs qui convertissent une grandeur physique en une quantité pouvant être traitée par les processeurs de calcul. Ils servent d'interfaces entre l'environnement extérieur et l'état interne du système en fournissant des informations sur ce dernier. Un défaut capteur se produit lorsque la mesure de la grandeur physique est erronée, pouvant être partiel ou total. La présence d'un défaut capteur dans un système de commande entraîne une diminution significative de ses performances.

Les défauts capteur les plus courants incluent les perturbations de mesure (bruits), la dérive, le biais, la sortie inefficace du capteur et la perte totale d'un capteur. Dans des domaines tels que l'industrie aéronautique et les réacteurs nucléaires, où des conditions de sécurité élevées sont requises, l'augmentation du nombre de capteurs est une nécessité pour améliorer la tolérance aux pannes[67].

4.3.3 Défauts dans le système (Défauts composants)

Les défauts qui ne sont ni des défauts capteurs ni des défauts actionneurs sont inclus dans cette catégorie. Ils entraînent des perturbations dans la dynamique du système en raison de variations paramétriques[68].

Généralement, un défaut composant est causé par des dommages à un composant interne, ce qui rend le système incapable d'exécuter une tâche spécifique. Par conséquent, cela entraîne une instabilité du système. Ces défauts peuvent perturber le fonctionnement normal du système et nécessitent des mesures correctives pour rétablir la stabilité et la performance du système[68].

4.4 Classification des Défauts

4.4.1 Classification selon leur représentation

Comme indiqué à la figure 4.2 et à la figure 4.3, les défauts peuvent être catégorisés en défauts additifs et défauts multiplicatifs selon leurs impacts sur les performances du système[69].

4.4.1.1 Défaut additif

Comme montré sur la figure 3.2, le défaut additif est un parasite qui s'ajoute à un signal du système. Les défauts capteurs et actionnaires appartiennent à cette catégorie[69].

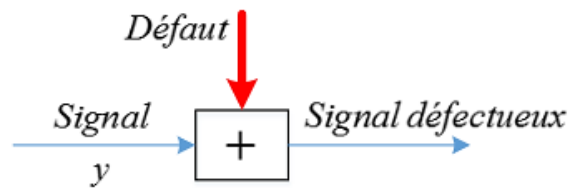


Figure 4. 2: Défaut additif [65].

4.4.1.2 Défaut multiplicatif

La figure 4.3 montre un défaut multiplicatif, ce type de défaut affecte la corrélation du signal de sortie du système.

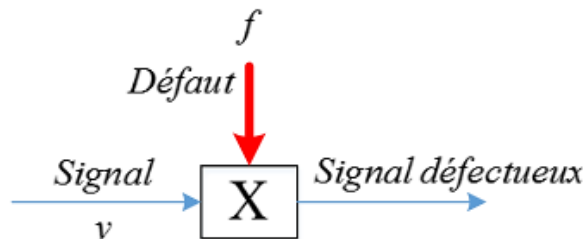


Figure 4. 3: Défaut multiplicatif [65].

Les défauts composants sont des défauts multiplicatifs, en ce qui concerne la modélisation des défauts, il est généralement plus facile de modéliser les défauts additifs, qui sont représentés par des signaux externes. En revanche, la modélisation des défauts multiplicatifs peut être plus complexe, car ils impliquent des changements dans les matrices du système. Cependant, pour simplifier la modélisation des défauts multiplicatifs, certains travaux ont adopté l'idée de les représenter sous forme additive [69].

4.4.2 Classification selon leur évolution dans le temps

Comme le montre la figure 4.4, les défauts sont également classés selon leurs comportements temporels.

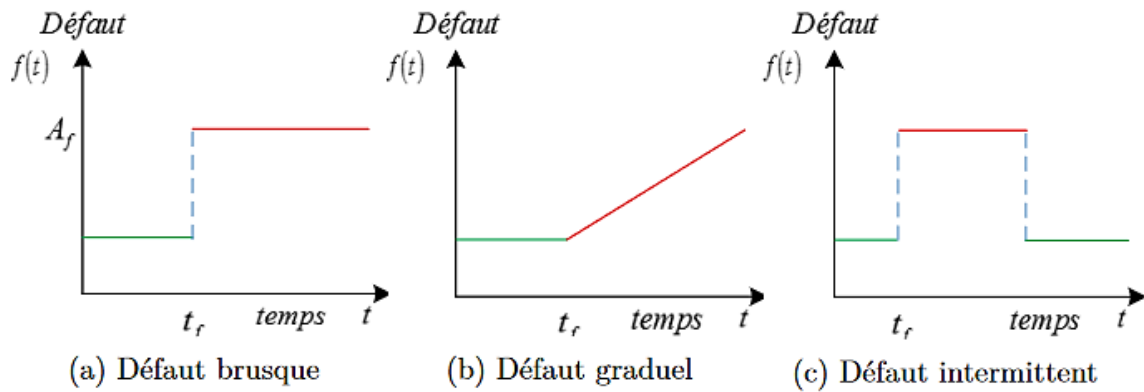


Figure 4. 4: Répartition temporelle des défauts [65].

4.4.2.1 Défaut brusque

Le défaut brusque se produit de manière instantanée, ce qui entraîne une panne soudaine du composant défectueux et perturbe ainsi la stabilité du système. Ce type de défaut est très grave et nécessite une réaction immédiate de la part d'un schéma de commande tolérante aux défauts pour y remédier[70].

Il peut être présenté mathématiquement par l'équation suivante :

$$f(t) = \begin{cases} A_f & t > t_f \\ 0 & t < t_f \end{cases} \quad (4. 1)$$

4.4.2.2 Défaut graduel

Ce type de défaut est de nature progressive, généralement associé à des problèmes intermittents tels que des capteurs présentant des faux contacts ou des signes de vieillissement. Il se caractérise par un dysfonctionnement temporaire qui le différencie du défaut brusque. Bien que moins grave que ce dernier, ce type de défaut est plus difficile à détecter en raison de sa dynamique lente et de ses manifestations intermittentes. Son évolution temporelle est une rampe exprimée par :

$$f(t) = \begin{cases} A_f + A_0 & t > t_f \\ 0 & t < t_f \end{cases} \quad (4. 2)$$

4.4.2.3 Défaut Intermittent

C'est un défaut qui apparaisse et disparaisse brusquement à plusieurs fois, par exemple à cause d'une usure d'un composant ou d'un encrassement[70].

4.5 Tolérante aux défauts

La tolérante aux défauts se réfère à la capacité d'un système contrôlé à maintenir les objectifs de commande même en présence d'un défaut. Bien qu'une dégradation des performances puisse être acceptée, il est important de préserver les fonctionnalités essentielles

du système. La tolérante aux défauts peut être obtenue en éliminant le défaut et/ou en reconfigurant le contrôleur pour s'adapter à la nouvelle situation. Cette approche permet de minimiser les effets négatifs du défaut et de maintenir le bon fonctionnement du système.

4.6 Détection de défauts

La détection de défaut c'est de confirmer la présence ou non d'un défaut ainsi que l'instant de son apparition dans le système.

4.7 Identification de défauts

Identifier un défaut c'est déterminer son amplitude et son évolution temporelle.

4.8 Commande Tolérante aux Défauts

Dans la plupart des systèmes d'ingénierie pratiques, il est inévitable que des défauts surviennent à tout moment au niveau des capteurs, des actionneurs et des composants. Ces défauts peuvent entraîner une dégradation des performances voire une instabilité du système de contrôle. C'est pourquoi il est crucial d'étudier la commande tolérante aux défauts et les problèmes qui y sont associés.

Depuis son introduction en 1971, l'objectif de la Commande Tolérante aux Défauts est d'améliorer la sécurité des technologies industrielles modernes en préservant la stabilité du système et en garantissant des performances de contrôle acceptables en cas de défaillance.

Grâce à la Commande tolérante aux défauts, il est possible d'éliminer l'impact des défauts sans interrompre le processus de production.

4.9 Classification des techniques de commande tolérante aux défauts

On distingue généralement deux approches principales de la commande tolérante aux défauts : la commande tolérante aux défauts passive et la commande tolérante aux défauts active. Cette classification est basée sur la structure de conception, la méthode mathématique utilisée, les performances de la commande et la gravité du défaut.

Comme illustré dans la figure 4.5, l'approche active consiste en la reconfiguration du système ou l'accommodation des défauts. Elle vise à modifier la configuration ou le fonctionnement du système pour compenser les défauts et maintenir des performances acceptables. En revanche, l'approche passive repose sur la commande robuste, qui cherche à concevoir des lois de commande capables de maintenir la stabilité et des performances satisfaisantes face aux variations et perturbations, sans reconfiguration du système.

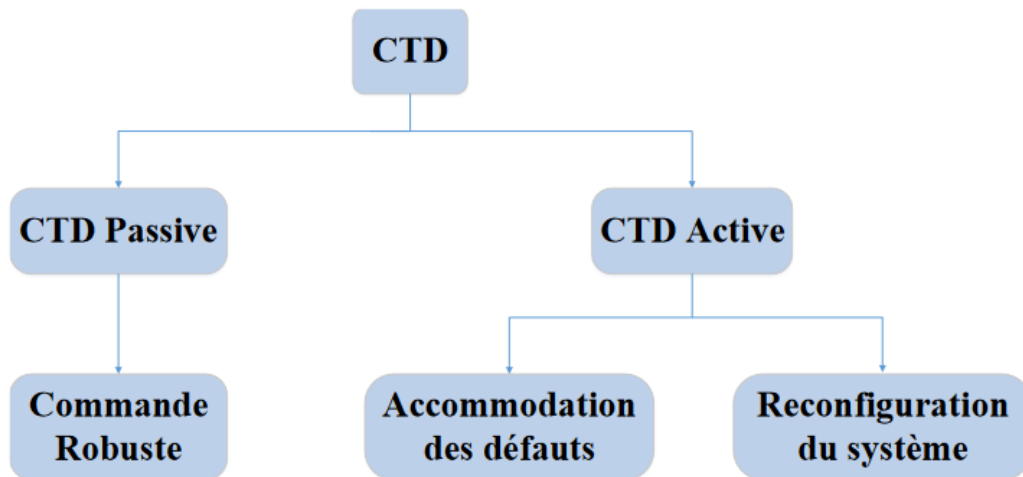


Figure 4. 5: Organigramme de la CTD[65].

Nous accorderons l'attention à l'approche active dans notre étude.

4.10 Approche active

La commande tolérante aux défauts active suscite un grand intérêt dans le domaine du contrôle tolérant aux défauts. Elle se base sur la compensation directe (en ligne) des défauts afin de maintenir la stabilité et les performances globales du système. Cette approche nécessite des informations en temps réel sur les défauts, ce qui implique une reconfiguration basée sur les données fournies par un Bloc de détection et de diagnostic des défauts.

L'approche de contrôle actif offre une flexibilité pour sélectionner ou synthétiser différents contrôleurs afin d'obtenir de meilleures performances. Comme illustré dans la figure 4.6, l'architecture de base d'une commande tolérante aux défauts active se compose de trois sous-systèmes : un bloc de détection et de diagnostic des défauts ou un bloc de détection et d'isolement des défauts, un contrôleur reconfigurable et un mécanisme de reconfiguration.

Ces deux derniers composants permettent de récupérer autant que possible les performances du système de commande qui étaient présentes avant l'apparition du défaut.

BDDD : Bloc de Détection et de Diagnostic des Défauts.

BDID : Bloc de Détection et d'Isolement des Défauts.

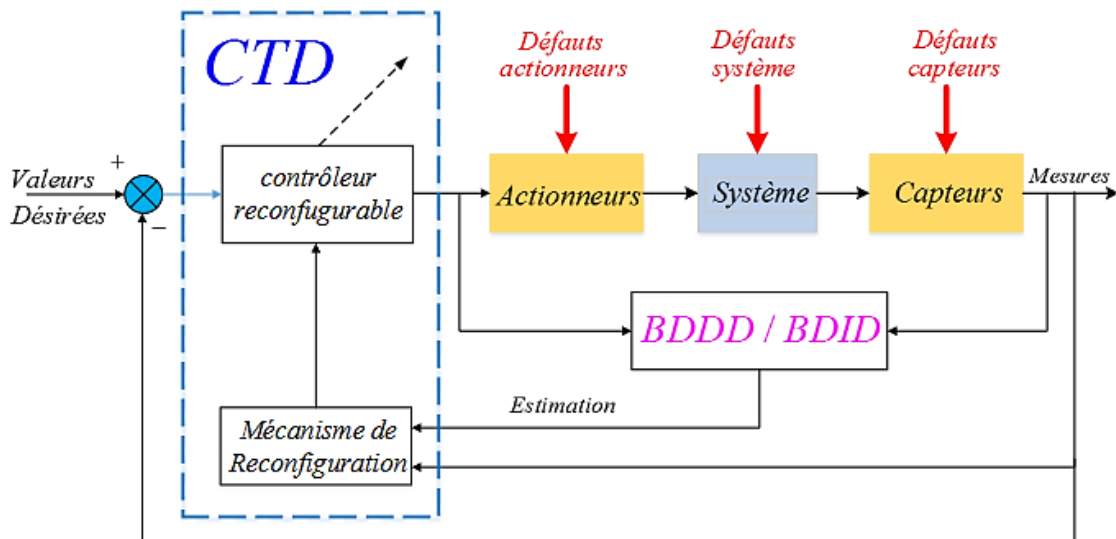


Figure 4. 6: CTD active [65].

4.11 Les avantages de la commande tolérante aux défauts active

La possibilité de traiter des défauts inconnus grâce à la détection et au diagnostic explicites des défauts et aussi à la reconfiguration du contrôleur.

- La possibilité d'atteindre la performance optimale.
- La capacité de traiter un nombre croissant de défauts.
- La capacité de traiter une large classe de défauts.

4.12 Application de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant d'un bras manipulateur

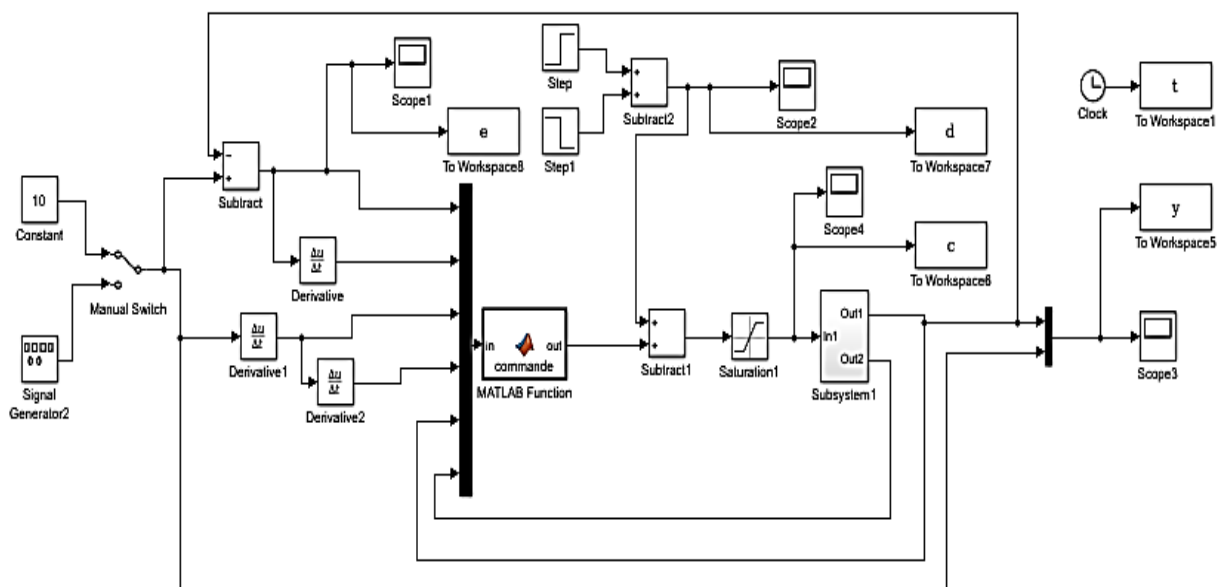
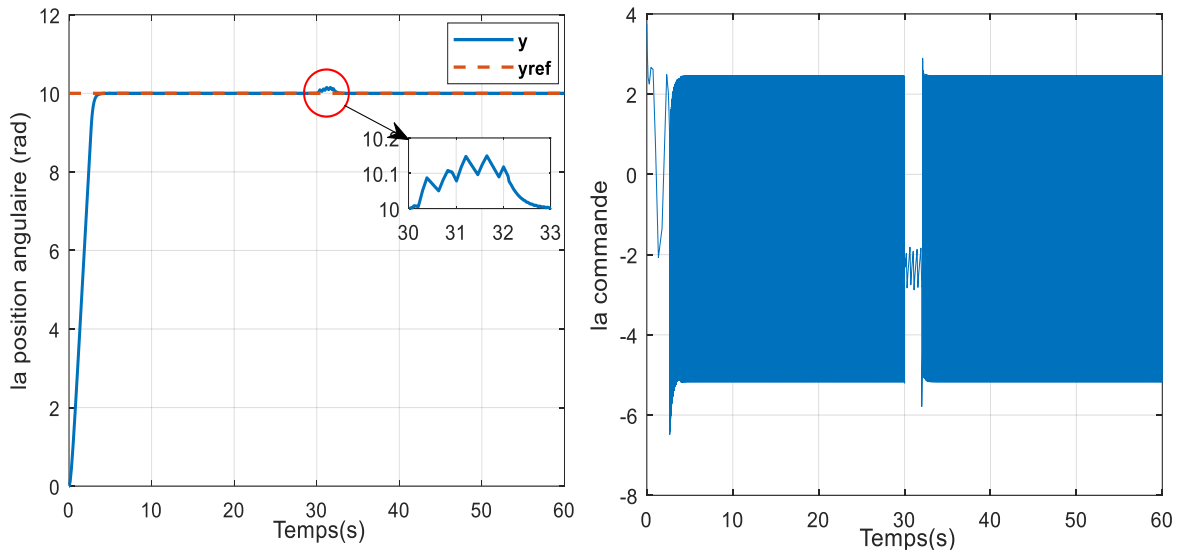


Figure 4. 7: structure de la commande par mode glissant avec défaut.

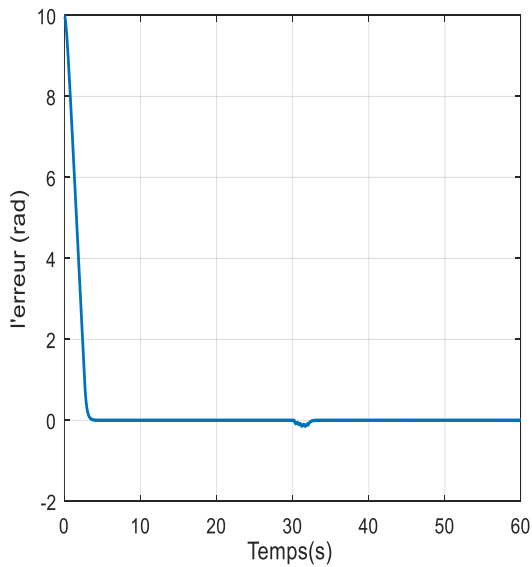
4.13 Présentations et interprétations des résultats de simulation

Les résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée échelon d'amplitude 10 :

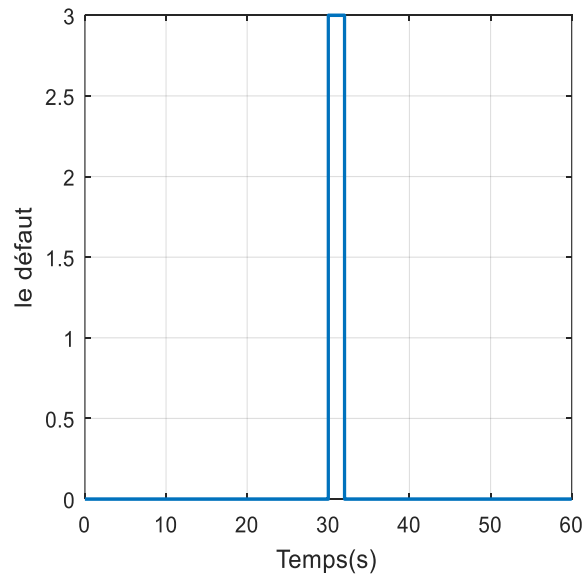


a. La sortie du système.

b. la commande du système.



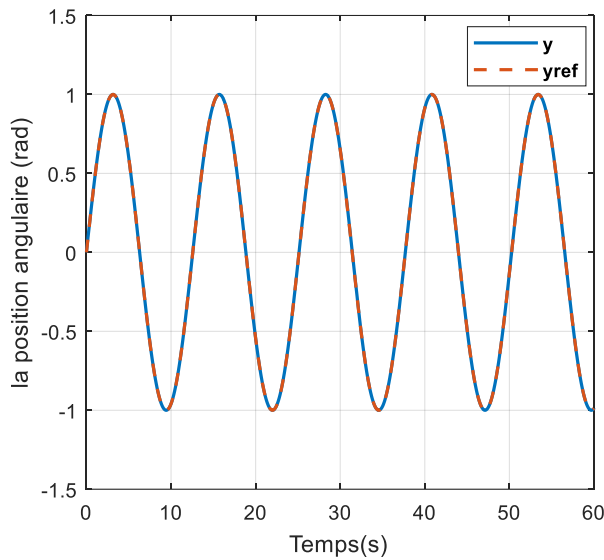
c. L'erreur du système.



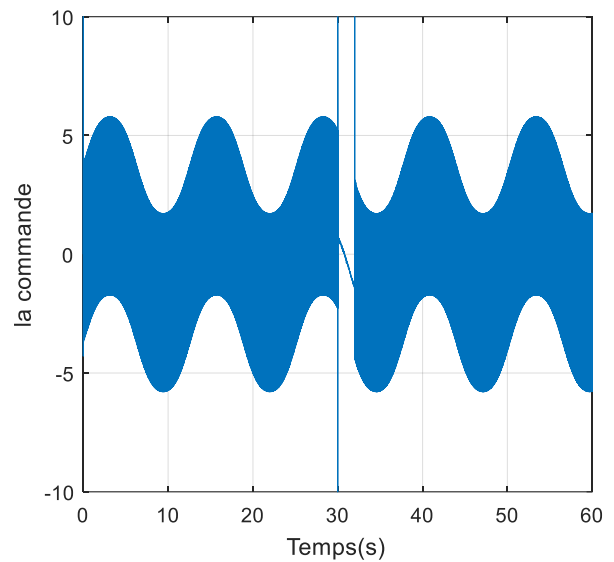
d. Le défaut du système.

Figure 4. 8: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée échelon.

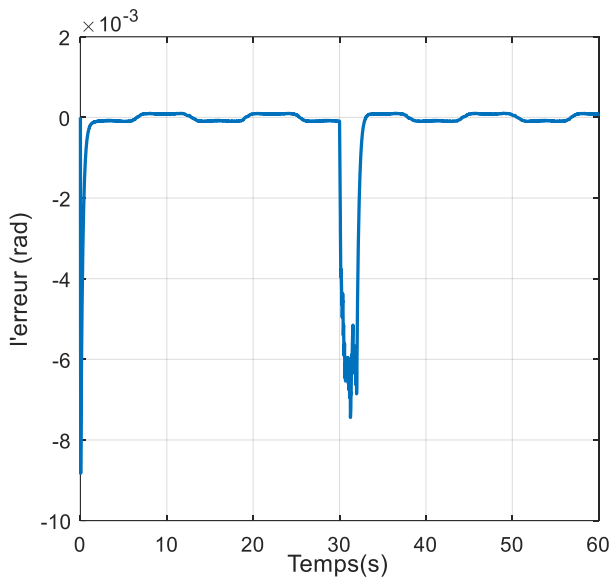
Les résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée sinusoïdale :



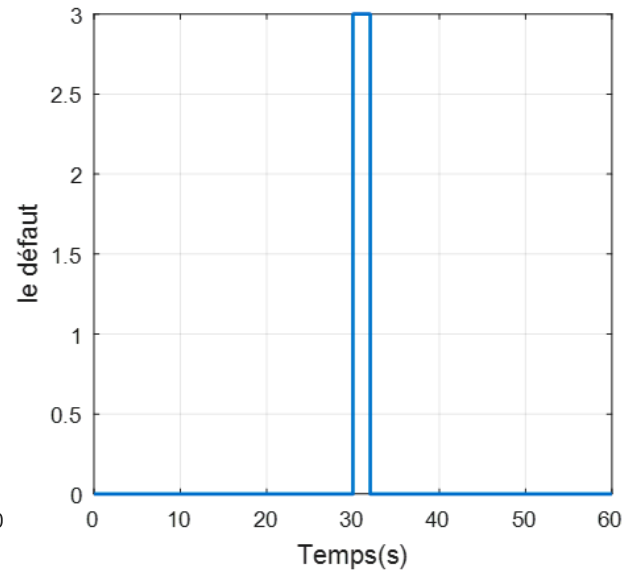
a. La sortie du système.



b. la commande du système.



c. l'erreur du système.



d. défaut du système.

Figure 4. 9: Résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée sinusoïdale.

Interprétations des résultats de simulation :

Les résultats obtenus de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant montrent une faible erreur statique entre la consigne et le signal de sortie. De plus, le phénomène de chattering se manifeste dans la commande du système.

À l'instant $t=30s$, une légère erreur statique apparaît, mais elle est pratiquement éliminée à partir de l'instant $t=33s$, maintenant ainsi la stabilité du système.

4.14 Application de la commande tolérante au défaut à base de backstepping d'un bras manipulateur

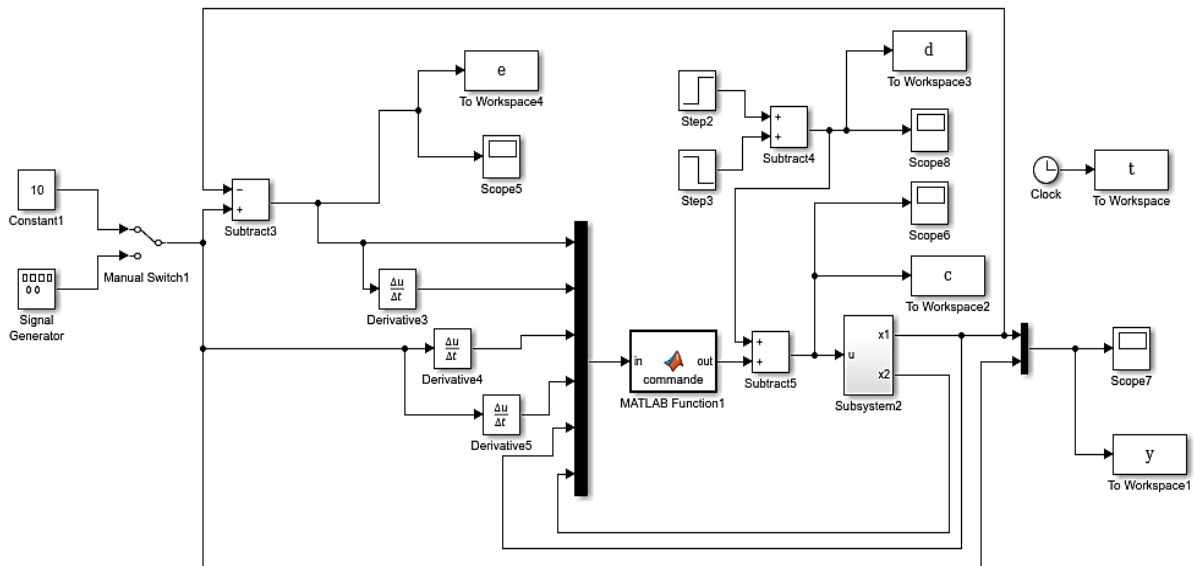
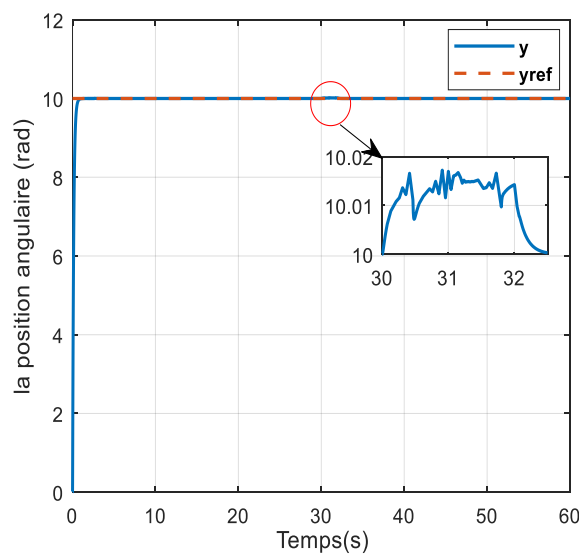


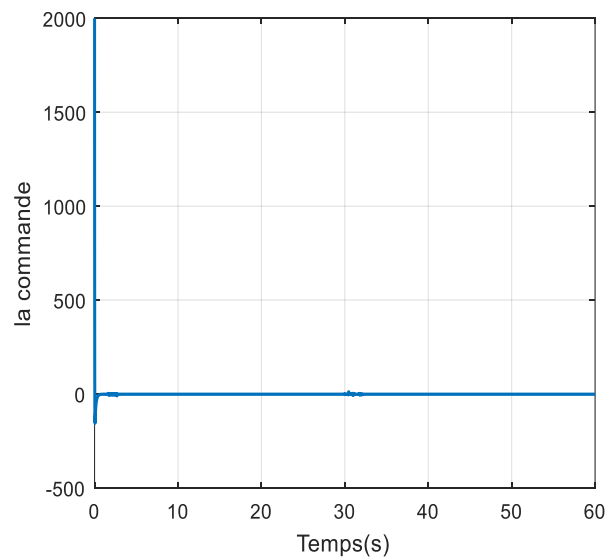
Figure 4. 10: Structure de la commande par backstepping avec défaut.

4.15 Présentations et interprétations des résultats de simulation

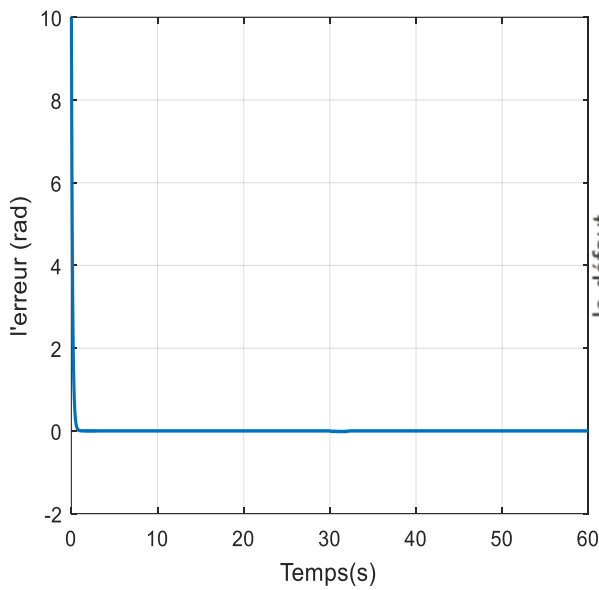
Les résultats de simulation obtenus de la commande tolérante au défaut à base de mode glissant, pour une entrée échelon d'amplitude 10 sont :



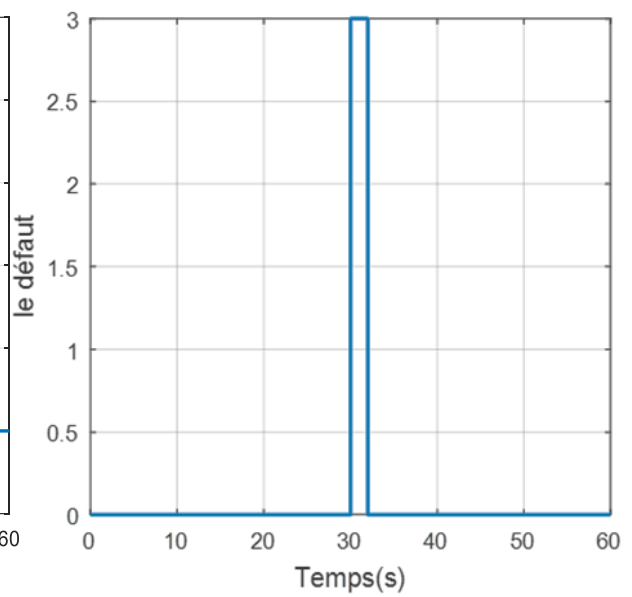
a. La sortie du système.



b. la commande du système



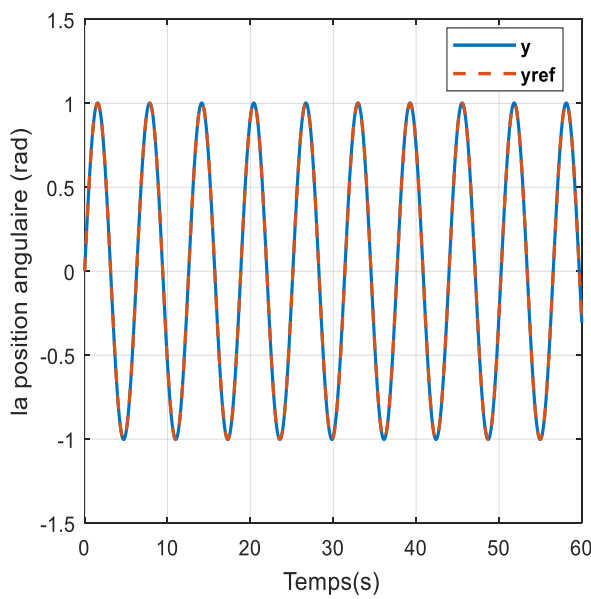
c. L'erreur du système.



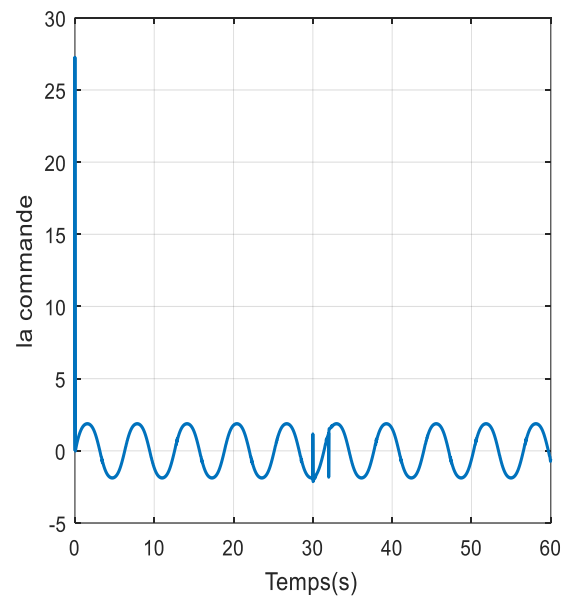
d. Le défaut du système.

Figure 4. 11: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping, pour une entrée échelon.

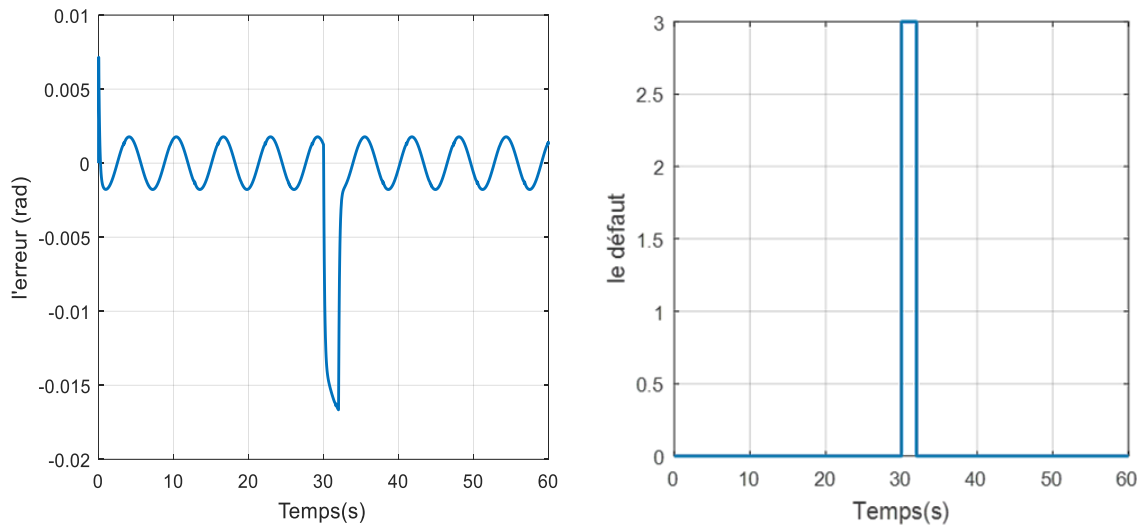
Les résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping, pour une entrée sinusoïdale :



a. La sortie du système.



b. la commande du système.



c. L'erreur du système.

d. Le défaut du système.

Figure 4. 12: Résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping, pour une entrée sinusoïdale.

Interprétations des résultats de simulation :

Les résultats obtenus de la commande tolérante au défaut à base de backstepping montrent que l'erreur statique entre la consigne et le signal de sortie est faible. Avec cette commande le phénomène de chattering a disparu dans la commande de système .

Le temps de réponse, qui caractérisent le régime transitoire, sont plus faibles que ceux de la réponse par régulateur par mode glissant.

A l'instant $t=30s$, il apparaît une faible erreur statique qui est pratiquement éliminée à partir de l'instant $t=33s$ et le système reste stable.

La figure (figure 4.15) illustre une comparaison entre les commandes tolérantes au défaut développées pour le bras manipulateur

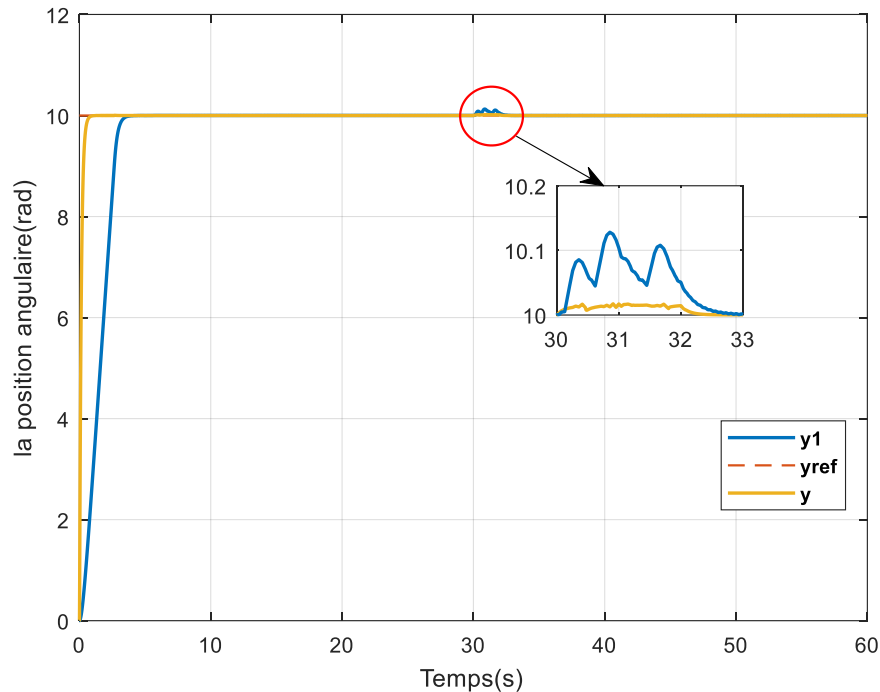


Figure 4. 13: résultats de simulation de la commande tolérante au défaut à base de backstepping et par mode glissant, pour une entrée échelon.

4.15.1 Interprétations

La simulation avec la technique de mode glissant démontre que le système est capable de maintenir une trajectoire précise malgré la présence de défaut. Cette méthode garantit la stabilité du système et la poursuite de la tâche de manipulation.

La simulation avec la technique de backstepping a également montré des résultats prometteurs. Cette dernière permet de réduire l'impact des défauts sur les performances du bras manipulateur, assurant ainsi une meilleure précision et une meilleure stabilité dans l'exécution des tâches.

Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons identifié les défauts comme un écart par rapport à la norme pouvant survenir à tout moment. Nous avons examiné en détail les différents types de défauts auxquels les systèmes peuvent être confrontés, ainsi que leur classification. Ces défauts peuvent entraîner une dégradation des performances et même une instabilité du système. Nous avons ensuite introduit le concept de commande tolérante aux défauts comme une approche visant à maintenir la stabilité et les performances d'un système en présence de défauts. Nous avons mis en évidence l'importance de la commande tolérante aux défauts active. Nous avons appliqué la commande tolérante aux défauts au bras manipulateur à un degré de liberté et Nous avons obtenu de bons résultats lors de la simulation.

Les résultats ont montré que la commande par backstepping donne une meilleure précision et une meilleure stabilité dans l'exécution des tâches que la commande par mode glissant.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le travail effectué dans cette mémoire concerne l'application des commandes non linéaires au bras manipulateur à un degré de liberté afin d'améliorer ses performances.

Dans un premier temps, on a introduit les concepts fondamentaux de la robotique, en présentant les différentes formes de modélisation (géométrique, cinématique et dynamique). Nous avons examiné en détail le modèle dynamique d'un bras manipulateur à un degré de liberté, qui est l'objet de notre application. Ce bras manipulateur est contrôlé à l'aide d'une régulation PID.

Pour réaliser une commande performante d'un bras manipulateur, on a introduit la technique de commande par mode glissant simple dans la deuxième partie. Cette commande est très connue par sa robustesse, stabilité, simplicité et temps de réponse très faible vis-à-vis l'insensibilité à la variation des paramètres internes et externes. Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants que ce soit pour le suivi des trajectoires ou erreur statique nulle mais avec la présence d'un certain broutement.

L'inconvénient majeur de cette technique est le phénomène de réticence. Ce phénomène est caractérisé par des oscillations indésirables et nuisibles pour les actionneurs. Afin d'éviter une réticence excessive de la commande. La fonction 'sign' est généralement remplacée par la fonction 'Sat'. Les résultats de la simulation montrent les avantages de la commande par mode glissant se situent à la robustesse qu'elle offre vis-à-vis des perturbations extérieures.

Troisièmes, on a appliqué la commande backstepping dans le but d'améliorer les performances, cette commande robuste est basée sur la méthode directe de Lyapunov. Les résultats obtenus ont montré que ce type de contrôle apporte des améliorations remarquables par rapport aux dernières commandes.

Finalement, on a présenté la commande tolérante aux défauts ainsi que son application au bras manipulateur. Cette commande a pour but de maintenir la stabilité et les performances des systèmes en présence de défauts. On a trouvé que la commande par backstepping donne une meilleure précision et une meilleure stabilité dans l'exécution des tâches que la commande par mode glissant.

Comme perspectives nous espérons d'appliquer ces méthodes expérimentalement sur un robot manipulateur.

Références bibliographie

Références bibliographie

- [1] Slotine, J.-J. E., & Li, W. « Applied Nonlinear Control. London ». Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [2] L. Fridman et A. Levant. « High-Order Sliding Modes Sliding Modes Control in Engineering». Ed. W. Perruquetti, J.P. Barbot, M. Dekker, Inc. New York, 2002.
- [3] Deghboudj Imen, « COMMANDE DES SYSTEMES NON LINEAIRES PAR MODE GLISSANT D'ORDRE SUPERIEUR ». Mémoire de magister 2013, UNIVERSITE CONSTANTINE 1.
- [4] H. Bühler, « Réglage par mode de glissement ». Traité d'électricité, 1ère édition, presses, 1991.
- [5] LABED AHMED OUSSAMA, « Commande non linéaire par Backstepping d'un system non linéaire complexe application au bras manipulateur ». Mémoire de master2021, Université de Ghardaïa
- [6] Makouf, « Commande robuste d'un variateur de vitesse pour la machine asynchrone ». Thèse de doctorat, université de Batna, 2003.
- [7] KADDOUR SABER et ZANAT SOHEYB, « Etude et réalisation d'un robot mobile commandé via androïde », mémoire de master 2021. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [8] <http://souspression.canalblog.com/archives/2012/02/01/13561147.html>.
- [9] ALLOUI, A. HADJ BRAHIM. « Proposition d'une solution multi-agent pour la commande et la coopération multi -robot mobile ». Mémoire d'ingénieur d'état en automatique, Université Biskra, Juin 2007.
- [10] Traité de robotique 1 les architectures conception, modélisations, équation, optimisation CHARES BOB.
- [11] Robotique générale ALAIN PRUSKI
- [12] ROBOTIQUE, ISTIA, Université Angers Jean-Louis Boimond.
- [13] Modélisation des robots manipulateurs-Abdallah ghouli université tahri mohammed bechar-19 février 2016.
- [14] P. Coiffet. Robot habilis, robot sapiens. Editions Herm 1993
- [15] https://fr.made-in-china.com/co_weili-robot/product_Industrial-Automatic-Robot_Manipulator-Arm_ennsoishy.html
- [16] https://www.electronicaembajadores.com/fr/Productos/Detalle/KV6A018/kits_velleman/robokits/kit-tobbie-le-robot-ksr18/
- [17] <https://www.a-m-c.com/fr/controlleurs-de-moteur-pour-robots-mobiles-autonomes/>

- [18] Lyliya BELAIDI « Conception et réalisation d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté » mémoire de master 2015.
- [19] BOUR Djilali, CHERIEF Makhoulouf « Commande d'un robot mobile Khepera IV » mémoire de master 2017.
- [20] <https://www.staubli.com/ch/fr/robotics/industries/pharmaceutique-et-sante/production-de-medicaments/robot-stericlean-pour-un-conditionnement-pharmaceutique-dune-grande-flexibilite.html>
- [21] <http://jf.duchet.pagesperso-orange.fr/robotique/Pages/applications.htm>.
- [22] <https://www.ufarevue.ch/fre/technique-agricole/un-robot-autonome-pour-le-semis-et-le-sarclage>
- [23] BOUABDALLAH Aymene BELHEND BadrEddine, « Réalisation et Commande à Distance d'un Robot Mobile Type Voiture avec Evitement d'Obstacle par Arduino », mémoire de master 2022. Université Mohamed Khider de Biskra
- [24] <https://blablachars.blogspot.com/2022/01/un-yack-mecanique-pour-larme-chinoise.html>
- [25] <https://cordis.europa.eu/article/id/421863-personal-robots-at-your-service/fr>
- [26] HAMANI NAIM & AZAZ AYMEN « Commande en position d'un robot manipulateur 5 DDL par le modèle géométrique inverse », mémoire de master 2022. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [27] <https://scient.fr/article-robotique-et-medecine/>
- [28] <https://pixabay.com/fr/illustrations/bras-de-robot-machinerie-structure-6668695/>
- [29] Ait Dahmane Kahina, Ait Ziane Meziane. « Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API », mémoire de master 2015. Université de KHEMIS MILIANA
- [30] BOUZID Abdelbaset & LARBI Allouani, « ETUDE D'UN ROBOT SERIEL », Mémoire de master 2021. Mohamed Boudiaf University of M'sila
- [31] <https://www.academia.edu/24706654/Chapitre>. Malik kaddouri.
- [32] Lillia MESSAOUDENE, Lynda SERIDJ « Etude comparative des techniques de commandes d'un bras manipulateur » mémoire de master ,2015
- [33] Wissama Khalil and Dombre Etienne. identification, Modélisation et commande des Robots manipulateurs. 1999
- [34] GACEM HADJIRA.KERNANE MESSAOUDA. « Implémentation De La Commande Intelligente Dans Un Robot à Deux Degrés De Liberté », mémoire de master 2020. UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJ-BOUIRA

- [35] GUEZOUT Djamel, « commande hybride en force position d'un bras manipulateur par FPGA », mémoire D'Ingénieur d'Etat en Automatique 2011. Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou
- [36] Nebbad Mounir, Lakhdari Abdelhamid « Conception et réalisation d'un système de pilotage d'un robot mobile à base d'un micro-contrôleur 80C51 », mémoire de master 2020.
- [37] Philippe Lelias. Modélisation, identification et commande dynamique d'un robot d'architecture par-allèle. Automatique / Robotique. 2013. dumas-01154107.
- [38] Cyril Quennouelle, "Modélisation Géométrico-Statique Des Mécanismes Parallèles Complains", Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 2009.
- [39] CHAAL Merouane, "Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaine continue ouverte". memoire de master professionnel.2013. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [40] Wisama KHALIL, Etienne DOMBR. Date de création : 08 mai 2012. Bases de la modélisation et de la commande des robots manipulateurs de type série
- [41] Commande des Robots Manipulateurs- Chebbah Abdelouahab- 2018-2019- Université de Jijel
- [42] BEN KHERIF Oussama, « Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent », mémoire de master 2016.
- [43] rabeih mohoun. nouiri mohamed ali, « étude et simulation de la commande d'un moteur bldc par la technique trapezoïdale ». mémoire de master2022.
- [44] <https://www.firediy.fr/article/asservissement-pid-drone-ch-8>.
- [45] Brahim KIYYOUR, « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile », thèse de Doctorat en sciences 2020. Université Mohamed Khider – Biskra
- [46] Achour « Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone ». IEEE Trans. Indust. Applic. Vol.40, N°.1, pp 45-55,2005.
- [47] Zouaoui Yamina, Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone statoriques de magister 2010. UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF.
- [48] BELFAR Nouredine & R AHLI Ammar, « Amélioration des performances d'une commande à base de mode glissant d'une machine asynchrone double Etoile », memoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [49] Fenni, Athmane. Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Université Mohamed Khider Biskra, 2013

- [50] Hadji abd elmelek et Amirat Boudjemaa, « commande des systèmes non linéaires par mode glissant », mémoire de master. UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
- [51] ACHOUR AMINE, ISSAD TOUFIK « Application de la technique des modes glissants dans la commande de la machine asynchrone », mémoire de master 2021. Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [52] L. Nemmour, « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2002.
- [53] Youcef BEKAKRA, « Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation », thèse de doctorat 2014. Université Mohamed Khider – Biskra
- [54] S. Peresada, A. Tilli et A. Tonielli, « Power control of a doubly fed induction machine via output feedback », Control Engineering Practice 12, Elsevier Science, pp: 41–57, 2003.
- [55] LAAMAYAD, Tahar. Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode glissant-Apport de la logique floue. Thèse de doctorat. Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid. 2014
- [56] TALHAOUI, Hicham. Contrôle par mode glissant: Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra. 2016.
- [57] BELFEDAL Saliha, « Modélisation et la commande floue – glissant d'un moteur à courant continu ». mémoire de master 2021. Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen.
- [58] BOUYEKNI, A, TALEB, R., BOUDJEMA, Z., et al. Commande par mode glissant d'ordre 2 pour une capture maximale d'énergie d'une turbine éolienne. Revue des Energies Renouvelables, 2018
- [59] Bey KHAOULA et Ben Toumi AMINA, « Commande robuste par mode glissant des systèmes non linéaires sous-actionnés », mémoire de master 2020, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [60] Mostefa Kamel Benyaya, Lakhdar Bensaadi. « Commande par Backstepping d'une Machine Asynchrone Double Etoile' », mémoire de master 2022. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- [61] Benidriss Abdelkader, Elhella Mohamed Elfateh. « Commande Backstepping d'une Machine Synchrone à Rotor Bobiné ». mémoire de master 2022. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [62] Mr BADRAOUI MOURAD et Melle BEREKSI REGUIG MERIEM. « Etude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la

- commande backstepping à la machine synchrone ». mémoire de master 2016. Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen
- [63] BELEGUELIEL SALAHEDDINE ET SMAÏLI MOHAMED. « Commande par Backstepping d'un Moteur à Commutation Electronique ». mémoire de master 2020. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [64] Salowa Methnani. « Diagnostic, reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs : application aux station dépurations des eaux usées ». Thèse de doct. Université de Toulon, France, 2012
- [65] LAYADI Nouredine, « Commande tolérante aux défauts de la machine asynchrone double étoiles », Thèse de DOCTORAT 2020. Université Mohamed Boudiaf-M'sila
- [66] Nassim Belkherchi. « Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle : Application aux procedes bio- logiques ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier-Toulouse III, France, 2011
- [67] Aziz Raisemche. « Commande tolérante aux défauts d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique ». Thèse de doct. Université Paris Sud-Paris XI, France, 2014.
- [68] Mickaël Rodrigues. « Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires ». thèse de doctorat 2005. Université Henri Poincaré, Nancy 1
- [69] Chakir, M. « Commande robuste tolérante aux défauts applications à la MSAP », Mémoire de magister, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, Alger, juin 2006.
- [70] BOUDINA Abdelmalik. « Commande Non Linéaire Tolérante aux Défauts Application à la Machine Synchrone à Aimant Permanent », mémoire de master 2014. UNIVERSITE DE m'sila

Résumé

Cette mémoire se concentre sur la commande tolérante au défaut d'un bras manipulateur à un degré de liberté. Nous avons exploré différentes approches de commande non linéaire, tout d'abord, nous avons utilisé la commande PID pour réguler le mouvement du bras manipulateur en ajustant les gains proportionnels, intégral et dérivé. Ensuite, nous avons appliqué le mode glissant afin de réduire les effets des perturbations et des incertitudes, assurant ainsi une performance stable et précise. Par la suite, nous avons utilisé la méthode du backstepping pour obtenir une trajectoire de référence souhaitée tout en maintenant la stabilité globale du système. Enfin, nous avons adopté une approche de commande tolérante au défaut à base de mode glissant et backstepping afin de maintenir les performances du bras manipulateur malgré la présence de défauts.

Mots clés : robot, bras manipulateur à 1ddl, régulateur PID, mode glissant, backstepping, commande tolérante au défaut.

Abstract

This thesis focuses on the fault-tolerant control of a manipulator arm with one degree of freedom. We explored different nonlinear control approaches, first, we used PID control to regulate the movement of the manipulator arm by adjusting the proportional, integral and derivative gains. Next, we applied the sliding mode to reduce the effects of disturbances and uncertainties, thus ensuring a stable and accurate performance. Subsequently, we used the backstepping method to obtain a desired reference trajectory while maintaining the overall stability of the system. Finally, we adopted a fault-tolerant control approach based on sliding mode and backstepping in order to maintain the performance of the manipulator arm despite the presence of faults.

Keywords: robot, 1ddl manipulator arm, PID controller, sliding mode, backstepping, fault tolerant control.

المخلص:

تركز هذه الأطروحة على التحكم المتسامح مع الخطأ في ذراع المناور بدرجة واحدة من الحرية. استكشفنا طرق تحكم غير خطية مختلفة، أولاً استخدمنا التحكم PID لتنظيم حركة ذراع المناول عن طريق ضبط المكاسب النسبية والتكاملية والمشتقة. بعد ذلك، طبقنا الوضع الانزلاقي لتقليل آثار الاضطرابات والشوك، وبالتالي ضمان أداء مستقر ودقيق. بعد ذلك، استخدمنا طريقة الخطوة للخلف للحصول على مسار مرجعي مرغوب مع الحفاظ على الاستقرار العام للنظام. أخيراً، اعتمدنا نهج التحكم في تحمل الأخطاء استناداً إلى الوضع الانزلاقي والخطوة الخلفية من أجل الحفاظ على أداء ذراع المناول على الرغم من وجود أعطال.

الكلمات المفتاحية: روبوت، ذراع مناور، وحدة تحكم PID، وضع انزلاقي، الخطوة للخلف، تحكم متسامح مع الخطأ.