الجمهـــوريـــة الجزائـــريـــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــم العـــالـــي والبـــحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Génie industrielle

Mémoire de fin du cycle pour l'obtention d'un Master :

Filière : Maintenance en Instrumentation et l'automatisme

Spécialité : Génie industriel

Thèmes :

Commande robuste avec observateur d'un bras manipulateur

Présenter et soutenu par :

- AHMED FUATIH H'nifi
- BENBOUAZZA Zakaria

Encadré par :

KACIMI Abderrahmane

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
A.Hamida	**MCB**	Univ-Oran2/IMSI	**Président**
A.Kacimi	**MCB**	Univ-Oran2/IMSI	**Encadreur**
M.A.Lalaoui	**MCA**	Univ-Oran2/IMSI	**Examinateur**

Année universitaire : 2024 /2025

Remercîment

Avant tout, je remercie Dieu, le tout-puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.Je tenais également à exprimer mon vif remerciement à mon encadrant, ***Monsieur KACIMI Abderrahmane,*** *pour avoir tout d'abord proposé ce thème et assuré le suivi de ce mémoire grâce à son aide, sa disponibilité et ses précieux conseils, ainsi que pour la confiance et l'intérêt qu'elle m'a accordés tout au long de la réalisation de ce travail.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury :

- *À Monsieur le Président, pour m'avoir fait l'honneur de sa présence en présidant pour L'évaluation de ce mémoire.*
- *À Monsieur l' examinateur, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à cette soutenance, pour le temps consacré à la lecture de mon travail et pour la richesse des échanges lors du débat.*

Je voudrais également remercier tous les enseignants de ***l'Institut de maintenance et de sécurité industrielle (IMSI) de l'Université de Oran 2,*** *pour avoir éclairé mon chemin par leurs connaissances et pour m'avoir enseigné toutes les sciences sans rien me cacher et a tous ceux qui m'ont aidé tout au long de mon parcours universitaire.*

Enfin, *j'adresse mes sincères remerciements à mes parents, à ma famille ainsi qu'à tous mes proches et amis qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*



Dédicace

Je dédie humblement ce travail à mes chers parents, qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours. À mon père, pour son soutien inébranlable, et à ma mère, pour sa lumière, son amour inconditionnel et sa patience infinie. Que Dieu les protège et les bénisse.

À Mr.KACIMI Abderrahmane , mon encadrant, dont les conseils avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.

À mes frères et sœurs, qui ont été mes complices, mes confidents et mes meilleurs supporters. Votre présence a été un réconfort constant.

À ma famille élargie, à mes tantes, oncles, cousins et cousines, dont le soutien et les encouragements ont été une source de force et de courage.

À mon amie,Abderrahmane , qui ont partagé mes joies, mes peines et mes succès. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours.

À mon Binôme, Zakaria, avec qui j'ai partagé ce voyage académique. Merci pour notre collaboration fructueuse et notre soutien mutuel.

À toute la section de la maintenance de l'instrumentation et l'automatisme promo 2020, pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui nous a unis.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont aimé(e) et soutenu(e), qui ont cru en moi et m'ont encouragé(e). Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation et je vous en suis infiniment reconnaissant(e)."

Hani



Dédicace

Je dédie humblement ce travail à mes chers parents, qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours. À mon père, pour son soutien inébranlable, et à ma mère, pour sa lumière, son amour inconditionnel et sa patience infinie. Que Dieu les protège et les bénisse.

À Mr.KACIMI Abderrahmane, mon encadrant, dont les conseils avisés, les orientations précieuses et le soutien constant ont été d'une aide inestimable dans l'élaboration de ce mémoire.

À mon frère Yacine , qui a été mon complice , mon confident et mon meilleur supporter. Votre présence a été un réconfort constant.

À ma famille élargie, à mes tantes, oncles, cousins et cousines, dont le soutien et les encouragements ont été une source de force et de courage.

À mes amis(es), Mohamed et Abderrahmane , qui ont partagé mes joies, mes peines et mes succès. Votre amitié est un trésor que je chérirai toujours.

À mon Binôme, Hani , avec qui j'ai partagé ce voyage académique. Merci pour notre collaboration fructueuse et notre soutien mutuel.

À toute la section de la maintenance de l'instrumentation et l'automatisme promo 2020, pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui nous a unis.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont aimé(e) et soutenu(e), qui ont cru en moi et m'ont encouragé(e). Votre confiance en moi a été ma plus grande motivation et je vous en suis infiniment reconnaissant(e)."

Zakaria

Résumé :

Ce travail porte sur la commande robuste d'un bras manipulateur en tenant compte des incertitudes et perturbations affectant son modèle dynamique. Les bras manipulateurs présentent une dynamique non linéaire et complexe, souvent soumise à des variations de paramètres et à des perturbations externes. Pour garantir la stabilité et la précision du système, même en présence de ces incertitudes, une loi de commande robuste est développée. De plus, certaines variables d'état nécessaires à la commande ne sont pas directement mesurables. Pour cette raison, un observateur d'état est conçu afin d'estimer ces grandeurs à partir des mesures disponibles. L'approche adoptée permet d'assurer un bon suivi de trajectoire, une meilleure stabilité du système, et une tolérance aux incertitudes.

Mots-clés : bras manipulateur, commande robuste, observateur d'état, incertitudes, dynamique non linéaire, suivi de trajectoire, stabilité, estimation d'état.

Abstract :

This work focuses on the robust control of a robotic manipulator arm, taking into account the uncertainties and disturbances affecting its dynamic model. Robotic manipulators exhibit nonlinear and complex dynamics, often subject to parameter variations and external disturbances. To ensure system stability and precision despite these uncertainties, a robust control law is developed. Furthermore, some state variables required for control are not directly measurable. Therefore, a state observer is designed to estimate these variables based on available measurements. The proposed approach ensures accurate trajectory tracking, improved system stability, and resilience to uncertainties.

Keywords : manipulator arm, robust control, state observer, uncertainties, nonlinear dynamics, trajectory tracking, stability, state estimation.

الملخص:

هذا العمل يتناول موضوع التحكم القوي (الروبوت) في ذراع آلي مع الأخذ بعين الاعتبار الشكوك والاضطرابات التي تؤثر على نموذجه الديناميكي. تُظهر الأذرع الآلية ديناميكية غير خطية ومعقدة، وغالبًا ما تكون معرضة لتغيرات في المعاملات واضطرابات خارجية. ولضمان استقرار النظام ودقته حتى في ظل وجود هذه الشكوك، تم تطوير قانون تحكم قوي. علاوة على ذلك، فإن بعض المتغيرات الحالة الضرورية لعملية التحكم لا يمكن قياسها بشكل مباشر، ولهذا السبب تم تصميم مراقب حالة لتقدير هذه القيم انطلاقًا من القياسات المتاحة. تُمكن هذه المقاربة من تحقيق تتبع جيد للمسار، وتحسين استقرار النظام، وتحقيق تحمل أكبر للشكوك .

الكلمات المفتاحية: ذراع آلي، تحكم قوي، مراقب حالة، شكوك، ديناميكية غير خطية، تتبع المسار، استقرار، تقدير.

Table des matières

Abstract : 5
Table des figures : 8
Table des Abréviations 10
..... 11
Introduction Générale : 11
Chapitre I : Modélisation du robot 13
I-1) - Introduction 13
I-2) - Généralités sur les robots 13
I-2.1) - Définition 13
I-2.1.1) - Définition du Petit Larousse 13
I-2.1.2) - Définition de la JIRA (Japan Industrial Robot Association) 13
I-2.1.3) - Définition de la RIA (Robot Institue of America) 14
I-3) - Classification des robots manipulateurs 16
I-3-1) - La structure cartésienne (PPP) 16
I-3-2) - La structure cylindrique (RPP) ou (PRP) : 17
I-3-3) - La structure sphérique ou polaire à axes de rotation orthogonaux : 17
I-3-4) - La structure dite SCARA (Selective Compliance Assemby Robot Arm) : 18
I-3-5) - La structure 3R (anthropomorphe) : 18
Conclusion : 19
Chapitre II : Modélisation d'un robot manipulateur à 3ddl 20
II-1)-Introduction : 21
II-2)- Modèle géométrique directe/ référentiels D-H 21
II-2-1) - Rapport des paramètres dans les matrices des éléments 24
II-3) - Modèle géométrique inverse 24
II-3-1) - Les paramètres d'entrée de l'algorithme 24
II-3-2) - Les différentes étapes de calcul de l'algorithme : 25
II-4) - Modèle dynamique du robot à 3ddl : 25
II-4-1) - Établissement du modèle de robot à trois degrés de liberté 25
II-4-2)- Les matrices de rotation 27
II-4-3)- Les données sur les vitesses angulaires 27
II-4-4)- Calcul de l'énergie cinétique totale T 27
II-4-5)- Calcul de l'énergie potentielle totale U 28
II-4-6- Équation du modèle dynamique sous forme matricielle 31
II-5. Conclusion 33

Chapitre III : Commande Par Modes Glissant Et Théorie Des Observateurs 34
III-1 Introduction 35
III.2. Historique de la commande par mode glissant : 35
III-3 Les systèmes à structure variable en mode glissant 36
III-4 Conception de la commande par mode glissant 37
III-4-1 Choix de la surface de glissement (S) 37
III-4-1-1 Degré relatif et choix de la surface de glissement 38
III-4-2 Condition d'existence de convergence 39
III-4-2-1 Fonction directe de commutation 39
III-4-2-2 Fonction de Lyapunov 39
III-4-3 Détermination de la commande 40
III-4-3-1 Commande équivalente 40
III-4-3-2 Commande de commutation 41
III-5 Synthèse de la loi de commande par mode glissant 42
III-5-1 Phénomène de réticence (chattering) 43
III-5-2 Solutions pour la suppression du phénomène de réticence 44
III-8 Conclusion 51
Chapitre IV : Commande Par Modes Glissant 52
Via un Observateur 52
A Grand Gain 52
Appliquée à Un Robot Manipulateur Rigide à 3ddl 52
IV-1 Introduction 53
IV-2 Résultats de simulations 53
IV-2-1 Schéma de simulations 53
IV-2-2 Résultats de simulation de la commande par couple calculé 54
IV-2-3 Résultats de simulation de la commande par mode glissant 56
Conclusion Générale Et Perspectives 69
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES 71

Table des figures :

Figure 1 Elements constitutifs d'un robot manipulateur 14
Figure 2 Structure cartésienne et son espace de travail 16
Figure 3 structure cylindrique et son espace de travail 17
Figure 4 structure SPHERIQUE et son espace de travail 17
Figure 5 structure SCARA et son espace de travail 18
Figure 6 structure ANTHROPOMORPHE et son espace de travail 18
Figure 7 SCHÉMA GÉOMÉTRIQUE DÛ ROBOT À 3ddl 21
Figure 8 SCHÉMA SYNOPTIQUE DÛ MODÈLE GÉOMÉTRIQUE du robot À 3ddl 21
Figure 9 SCHÉMA DESCRIPTIF du MODÈLE GÉOMÉTRIQUE du robot a 3ddl 22
Figure 10 CHOIX des REPÈRES du MODÈLE GÉOMÉTRIQUE du robot 3ddl 22
Figure 11 CHOIX des REPÈRESdu MODÈLE GÉOMÉTRIQUE du robot À 3ddl 23
Figure 12 les PARAMETRES de D-H pour les REPÈRES du MODÈLE GÉOMÉTRIQUE du robot a 3DDL 23
Figure 13 robot a trois DEGRÉS de LIBERTÉ RRP 26
Figure 14 DIFFÉRENTS MODES POUR LA TRAJECTOIRE DANS LE PLAN PHASE 37
Figure 15 SURFACE DE GLISSEMENT 39
Figure 16 REPRESENTATION DE LA COMMANDE DISCONTINUE 41
Figure 17 SCHÉMA DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT 42
Figure 18 PHÉNOMÈNE DE CHATTERING 44
Figure 19 FONCTIONS DE COMMUTATION 45
Figure 20 SCHÉMA D'UN OBSERVATEUR D'ETAT EN BOUCLE OUVERTE 45
Figure 21 SCHEMA D'UN OBSERVATEUR D'ETAT DE LUENBERGER 48
Figure 22 SHEMA DE COMMANDE AVEC OBSERVATEUR A 3DDL EN BOUCLE FEMEE 53
Figure 23 TABLE DES PARAMETRES REELS ET NOMIBAUX DU ROBOT MANIPULATEUR 3DDL 54
Figure 24 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 1 EN RAD 54
Figure 25 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 2 EN RAD 55
Figure 26 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 3 EN M 55
Figure 27 SIGNAUX DES COUPLES DE COMMANDES EN M 55
Figure 28 ERREURS DE SUIVI DE POSITION DES 3 ARTICULATEURS EN RAD ET M 56
Figure 29 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 1 EN RAD 57
Figure 30 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 2 EN RAD 57
Figure 31 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 3 EN 58
Figure 32 SIGNAUX DES COUPLES DE COMMANDES EN NM 58
Figure 33 ERREURS DE SUIVI DE POSITION DES 3 ARTICULATION EN RAD ET M 59
Figure 34 q1 incertain 59
Figure 35 q2 incertain 61

Figure 36 q3 incertain 63
Figure 37 couple control incertain 64
Figure 38 suivi de trajectoire 65
Figure 39 erreur de suivi 66
Figure 40 signal de commande 67
Figure 41 réponse face aux pérturbation 67

Table des Abréviations :

N°	Abréviation	***Signification***
1	**DDL**	*Degrés de liberté*
2	**JIRA**	*Japan Industrial Robot Association*
3	**MGD**	*Modèle Géométrique Direct*
4	**MGI**	*Modèle Géométrique Inverse*
5	**MIMO**	*Multiple Input Multiple Output*
6	**PD**	*Proportionnel-Dérivé (contrôleur)*
7	**PID**	*Proportionnel-Intégral-Dérivé (contrôleur)*
8	**PPP**	*Structure cartésienne : Prismatique-Prismatique-Prismatique*
9	**PRP**	*Structure cylindrique : Prismatique-Rotatif-Prismatique*
10	**PWM**	*Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)*
11	**RIA**	*Robot Institute of America*
12	**RRP**	*Structure du robot : Rotatif-Rotatif-Prismatique*
13	**SCARA**	*Selective Compliance Assembly Robot Arm*

Introduction Générale :

Le développement rapide de l'industrie a entraîné le perfectionnement des robots manipulateurs parmi ces robots, les bras manipulateurs sont largement utilisés dans l'industrie pour des tâches variées de manipulation, de manutention, d'assemblage ou de précision. Ceux-ci doivent désormais manipuler avec des vitesses élevées et des précisions de plus en plus accrues.

Ce travail s'intéresse à la commande robuste d'un bras manipulateur en présence d'incertitudes et de perturbations, en utilisant un observateur d'état pour la reconstruction des variables non mesurées. L'objectif est de garantir un bon suivi de trajectoire et une stabilité du système, tout en minimisant l'impact des incertitudes et des limitations de mesure.

En fin, dans le domaine de l'industrie, l'avènement de la vision a permis aux bras manipulateurs d'être plus autonomes ce qui leur a permis de se substituer à l'homme lors de tâches en milieu hostile et dangereux comme le nucléaire, ou lors de tâches répétitives et précise comme la détection de défauts.

C'est ainsi que nous avons partagé ce travail en quatre chapitres repartie comme suit :

Chapitre I s'intéresse à la Modélisation du robot ou il y'aura lieu d'invoquer la généralité sur le robot ; sur les différents définirons de modélisation ainsi que les différents structures du robot. S'en suite, nous disposons dû **chapitre II** est consacré à la modélisation d'un robot manipulateur à 3ddl et ses différents modèles. Passant par, **le chapitre III** ou on va montrer les commandes par couple calculé et théorie d'observateur ou on va définir les deux séparément après on va voir leurs fonctionnalité pour finaliser avec les différents catégories des observations.

Dans **le chapitre IV** nous allons parler principalement sur la structure de simulation et les différents analyses et résultats qui suit ;

En dernier lieu nous allons conclure avec un récapitulatif de l'acheminement de la procédure.

Chapitre I :
Modélisation du robot

I-1) - Introduction :

Pour effectuer l'analyse et la synthèse d'un système dynamique il est nécessaire de connaitre les relations entre ses grandeurs d'entrées et ses grandeurs de sorties. L'ensemble de ces relations constituent le modèle mathématique du système considéré. L'efficacité de ce modèle repose sur une analogie entre le comportement des objets physiques et celui des êtres mathématiques.

Modéliser un système consiste à établir l'ensemble des relations mathématiques qui permettent de décrire, avec une précision suffisante, les interactions entre ce système et son environnement extérieur. Lorsque les relations sus citées sont issues des équations de la physique, la modèle obtenu est dit modèle de connaissance si ces relations découlent des observations disponibles sur les systèmes, on aboutit au modèle de représentation obtenu par identification. Dans le domaine de la robotique l'élaboration du modèle nécessite une étude approfondie et détaillée sur la structure du robot.

Dans ce chapitre, et après avoir donné quelques notions de base sur les robots manipulateurs, le robot utilisé dans notre travail sera présenté et les différents modèles qui le caractérise seront définis et élaborés (modèles cinématique, géométrique et dynamique). On termine par la simulation en boucle ouverte du modèle dynamique du robot.

I-2) - Généralités sur les robots :

I-2.1) - Définition :

Pour le sens commun, un robot est un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets ou la locomotion dans le but de se substituera l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles. (1)

Plusieurs autres définitions ont été proposées pour qualifier un robot, parmi lesquelles on peut citer.

I-2.1.1) - Définition du Petit Larousse :

« Un robot est une machine automatisée conçue pour manipuler des objets ou réaliser des tâches en suivant un programme, qu'il soit prédéfini ou ajustable ». (2)

I-2.1.2) - Définition de la JIRA (Japan Industrial Robot Association) :

« C'est un système versatile doté d'une mémoire et pouvant effectuer des mouvements comme ceux d'un opérateur humain ». (3)

I-2.1.3) - Définition de la RIA (Robot Institue of America) :

« Un robot est un manipulateur reprogrammable à fonctions multiples. Il est conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des instruments spécialisés suivant des trajectoires variables programmées, en vue d'accomplir des tâches très diverses » .(4)

Eléments constitutifs d'un robot manipulateur :

Les robots manipulateurs ou industriels, dont le robot que nous étudions en fait partie, constituent la classe la plus répandue de robots actuellement en service dans l'industrie.

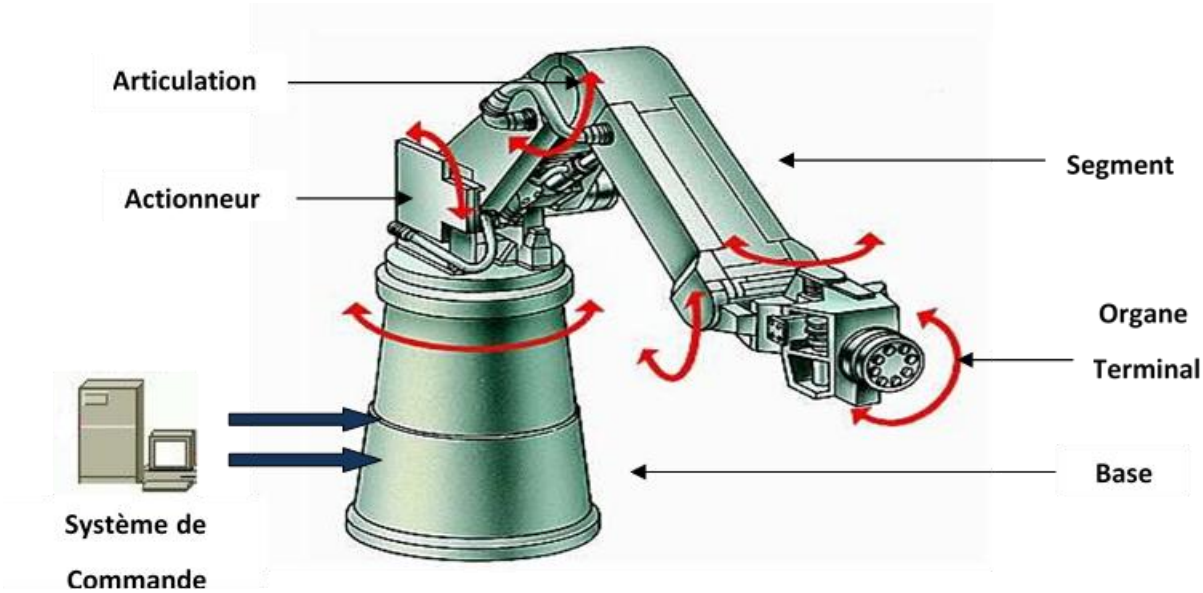


FIGURE 1 ÉLEMENTS CONSTITUTIFS D'UN ROBOT MANIPULATEUR

- **La base :**

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

- **Le porteur :**

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé. Il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tâche. Il est constitué de

- **Les segments** : corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres.

- **Articulations :** Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre. On distingue, généralement, deux types d'articulations, rotoïde et prismatique.
  - ✓ **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 commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe. Ce type d'articulation est schématisé par un cylindre.



  - ✓ **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. Ce type d'articulation est schématisé par un parallépipède.



- **Les actionneurs :**

  Pour être animé, la structure mécanique articulée comporte des moteurs le plus souvent associés à des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs. Les actionneurs utilisent fréquemment des moteurs électriques. Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, comme ils peuvent être de nature pneumatiques.

- **Les capteurs :**

  Ils peuvent fournir des informations sur l'état mécanique robots (capteurs proprioceptifs) comme ils peuvent fournir des informations sur l'environnement du robot (capteurs extéroceptifs). Ces informations sont nécessaires pour la commande du robot Ils peuvent être des capteurs de position, vitesse, accélération, force, caméra…etc.

- **L'organe terminal**

  C'est un dispositif fixé à l'extrémité mobile du robot destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques…) ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture…). Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable.

Le système de commande

Il permet de piloter les actionneurs du robot en fonction des mesures fournies par les capteurs et les consignes fournies par un opérateur humain.

I-3) - Classification des robots manipulateurs :

Les robots manipulateurs sont généralement classés selon leur structure géométrique autrement dit l'architecture de leur porteur [4] [2] [7]. Bien qu'on puisse avoir plusieurs architectures suivant le nombre et lanature des articulations du porteur, il n'y a que cinq structures qui sont les plus répandues dans l'industrie ou sur le marché : cartésienne, cylindrique, sphérique, SCARA et anthropomorphique.

I-3-1) - La structure cartésienne (PPP) :

A trois liaisons prismatiques, c'est la structure la plus ancienne. Elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes. Cette structure offre une très bonne rigidité mécanique mais une faible dextérité. Elle est utilisée dans la manutention et l'assemblage.

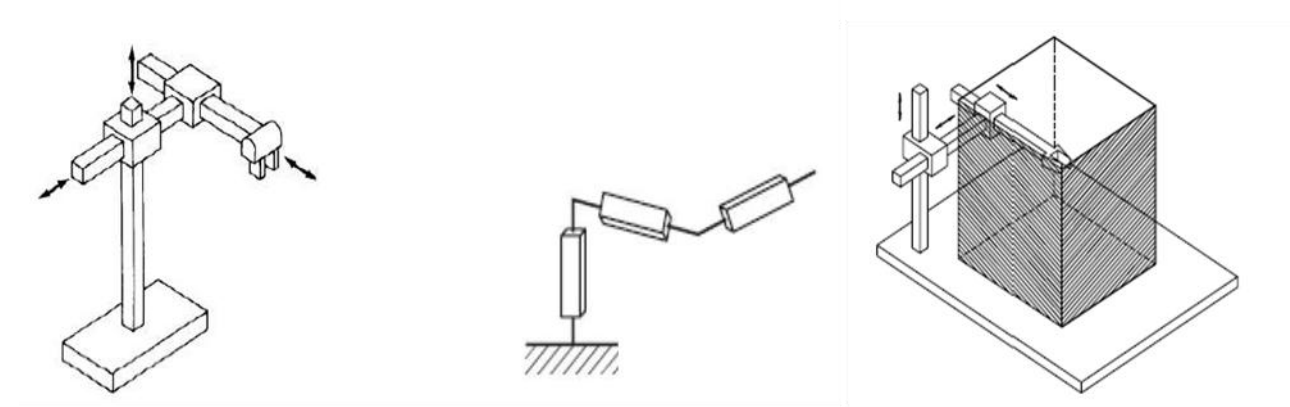


FIGURE 2 STRUCTURE CARTESIENNE ET SON ESPACE DE TRAVAIL

I-3-2) - La structure cylindrique (RPP) ou (PRP) :

Elle associe une rotation et deux translations. Elle présente l'inconvénient d'offrir un volume de travail faible devant un encombrement total important. Elle n'est pratiquement plus utilisée.

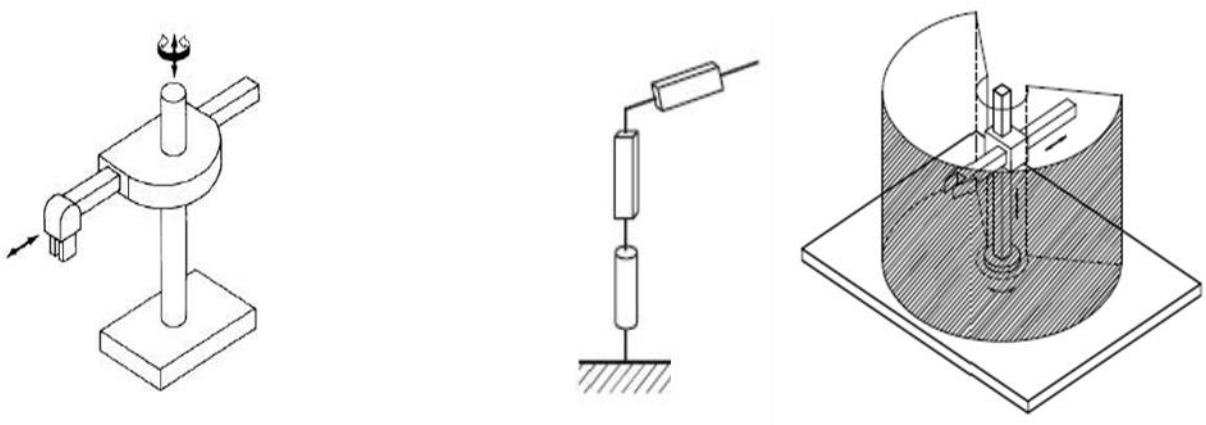


FIGURE 3 STRUCTURE CYLINDRIQUE ET SON ESPACE DE TRAVAIL

I-3-3) - La structure sphérique ou polaire à axes de rotation orthogonaux :

C'est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structurecylindrique.

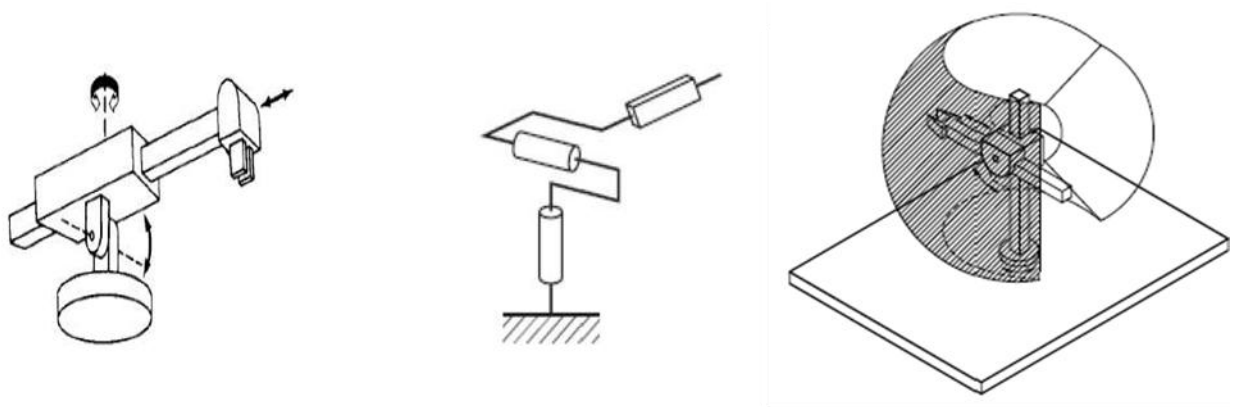


FIGURE 4 STRUCTURE SPHERIQUE ET SON ESPACE DE TRAVAIL

I-3-4) - La structure dite SCARA (Selective Compliance Assemby Robot Arm) :

A axes de rotation parallèles, cette structure est l'une des plus utilisées, en particulier pour des taches de manutention ou d'assemblage très fréquents dans l'industrie. Ce succès commercial est liéau fait que le ratio entre le volume de travail et l'encombrement est très favorable et aussi que la structure SCARA est très adaptée à ce type de taches.

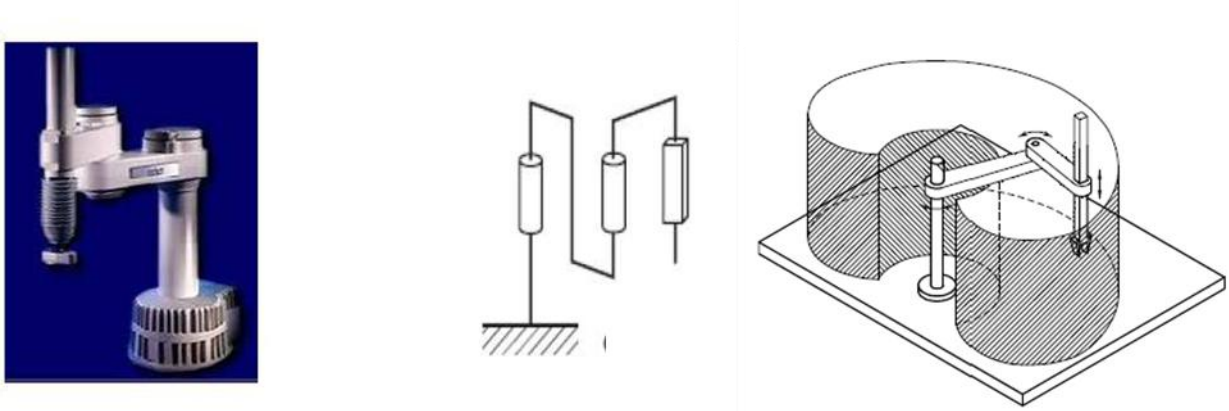


FIGURE 5 STRUCTURE SCARA ET SON ESPACE DE TRAVAIL

I-3-5) - La structure 3R (anthropomorphe) :

Cette structure permet d'amener un solide en un point de l'espace par trois rotations, généralement une à axe vertical et deux à axes horizontaux et parallèles. C'est le porteur « généraliste » par excellence, pouvant se programmer facilement pour différent types de taches et disposant d'volume de travail conséquent.

Un exemple type de cette structure est le robot PUMA (Programmable Universal Manipulator for Assembly)

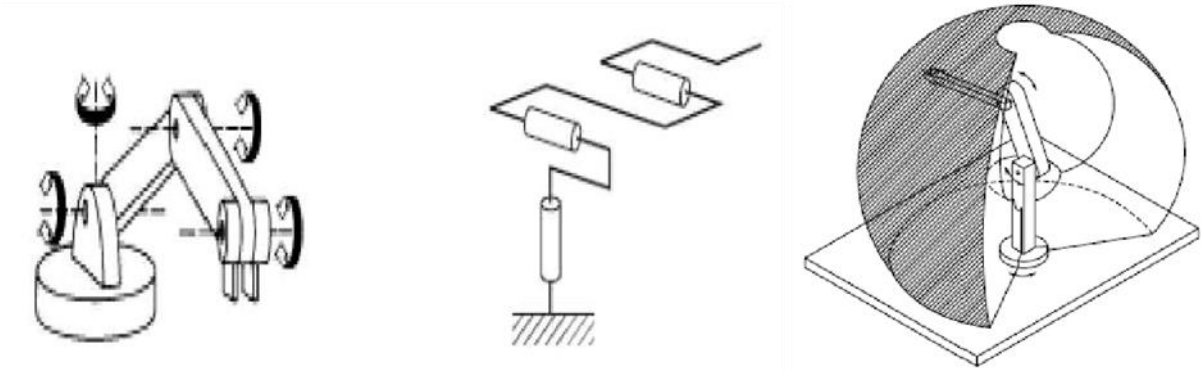


FIGURE 6 STRUCTURE ANTHROPOMORPHE ET SON ESPACE DE TRAVAIL

Conclusion :

Tout d'abord, dans ce chapitre nous avons noté que la modélisation ne s'arrête pas là. Dans le cadre du travail, le moteur électrique d'une des articulations a été modélisé. On peut de ce fait se rapprocher de plus en plus de la réalité même si certaines hypothèses ont été posées, telles que l'accélération angulaire, tout en gardant une certaine logique matérielle. De même, les inerties et masses n'ont été qu'approchées.

L'aboutissement de cette étude serait le relevé de mesures en temps réel sur le robot afin de comparer la cohérence du modèle. C'est dans le cas présent par manque d'expérience quant au démontage et réassemblage du robot, que de tels essais n'ont pu être pratiqués.

Le développement le plus intéressant reste sans conteste la prévision des mouvements. Eviter les collisions est désormais possible.

En ce qui concerne l'approche dynamique, la voie est ouverte vers une étude plus approfondie dans le domaine de la régulation. L'utilisation d'un régulateur simple mais universel offre déjà des résultats plus que satisfaisants.

La conscience des limitations physiques du système a dû être constamment présente. Rappelons que la synthèse d'une loi de commande doit prendre en compte une saturation inévitable des organes de commande.

Chapitre II :

Modélisation d'un robot manipulateur à 3ddl

II-1)-Introduction :

La modélisation d'un robot à 3 degrés de liberté constitue une étape fondamentale dans l'analyse et le développement de systèmes robotiques. Elle permet de décrire précisément les mouvements possibles du robot en fonction de sa structure mécanique. Ce chapitre présente les outils nécessaires pour établir les équations cinématiques et dynamiques du robot, afin de mieux comprendre son comportement et faciliter sa commande.

II-2)- Modèle géométrique directe/ référentiels D-H

On désire trouver la « matrice du bras », pour le cas présente dans la fig. Ci-dessous. Définir les référentiels de ce bras selon la méthode Denavit-Hartenberg.

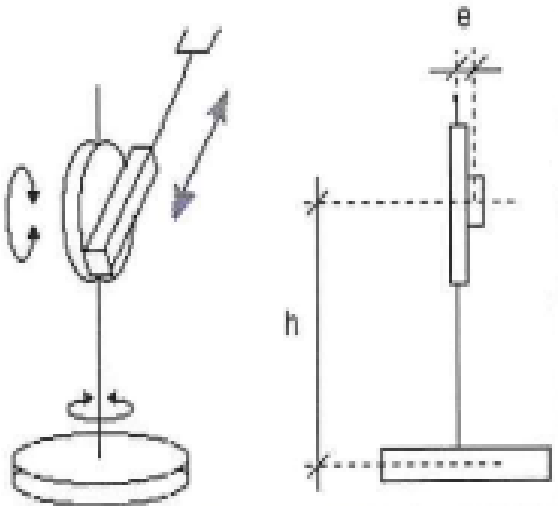


FIGURE 7 SCHÉMA GÉOMÉTRIQUE DÛ ROBOT À 3DDL

La méthode de Denavit-Hartenberg est extrêmement importante tant pour les systèmes réels qu'en virtuel

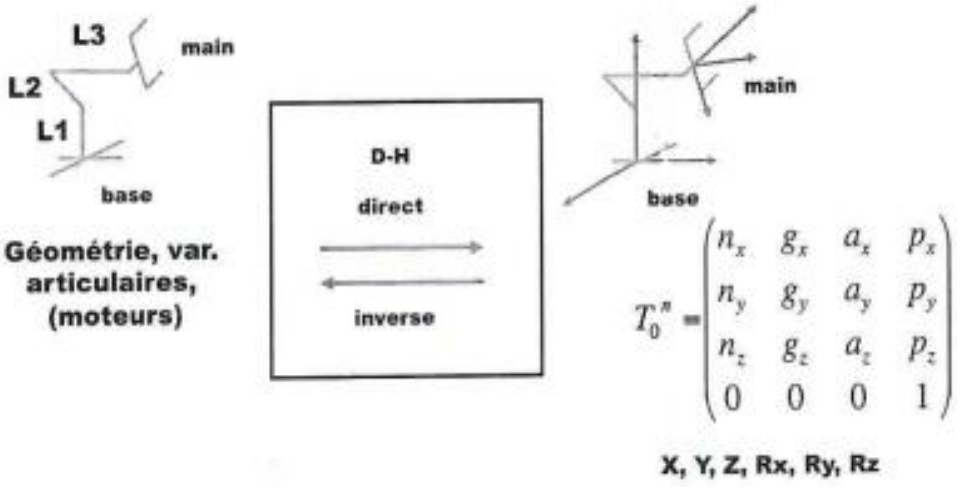


FIGURE 8 SCHÉMA SYNOPTIQUE DÛ MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT À 3DDL

A: les axes de mouvement 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux deux premières rotations puis à l'articulation prismatique. Enfin l'axe 4 est dans la direction d'approche de l'outil.

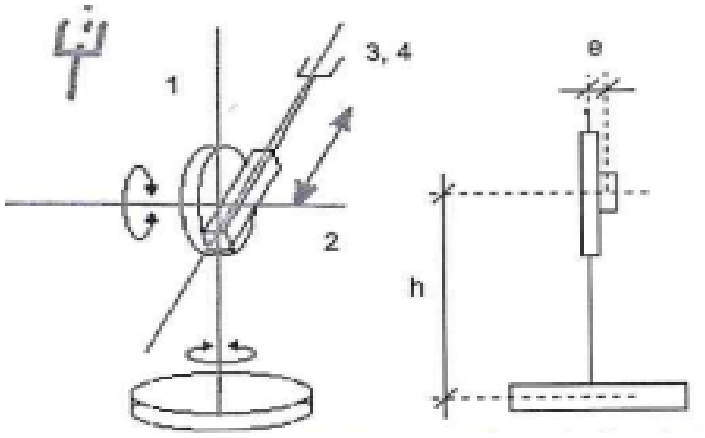


FIGURE 9 SCHÉMA DESCRIPTIF DU MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT A 3DDL

B1: Les axes de mouvement 1, 2, 3 et 4 donnent naturellement les axes Z_0, Z_1, Z_2 et Z_3, respectivement.

B2 : les axes X_I sont sur une Normale commune à Z_{i-1} et à Z_i, pointant loin de Z_{i-1}.

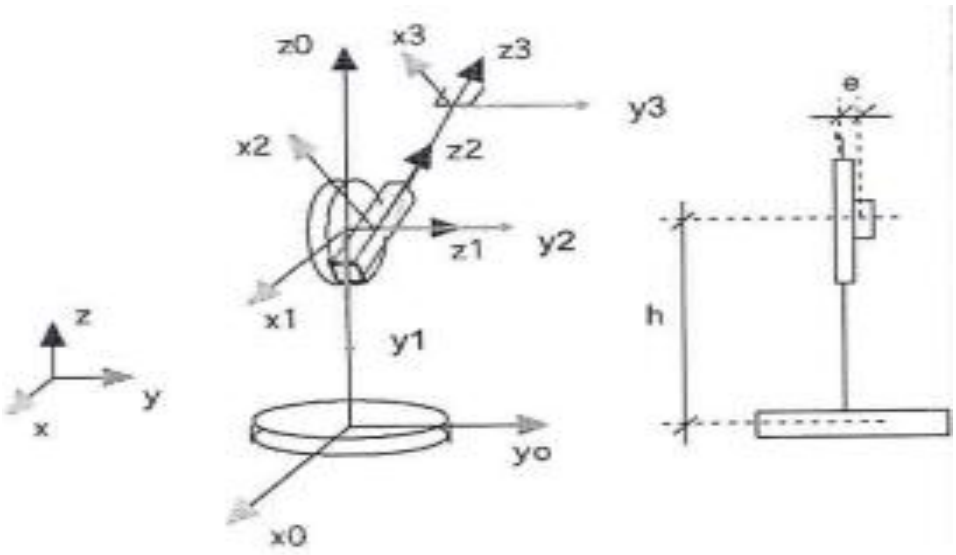


FIGURE 10 CHOIX DES REPÈRES DU MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT 3DDL

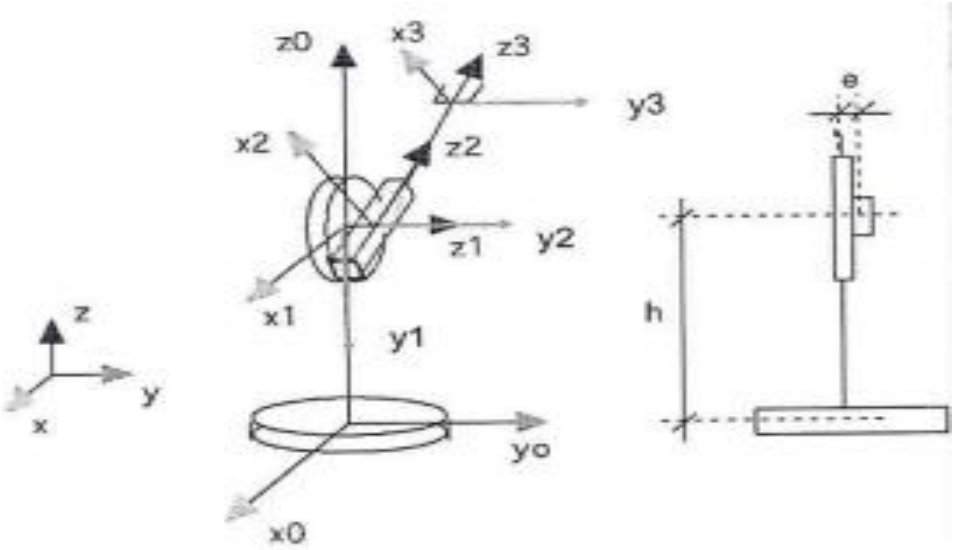


FIGURE 11 CHOIX DES REPÈRES DU MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT À 3DDL

B3 : les axes Yi complètent les Repères (par ex : règle du tire-bouchon)

- Trouver les paramètres θ_i, d_i, a_i de D-H correspondant aux référentiels établis ci-dessous, ainsi que les matrices Ai correspondantes.

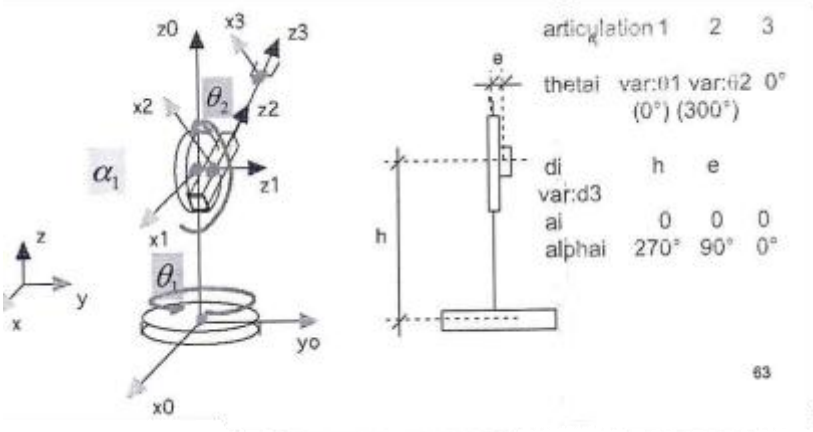
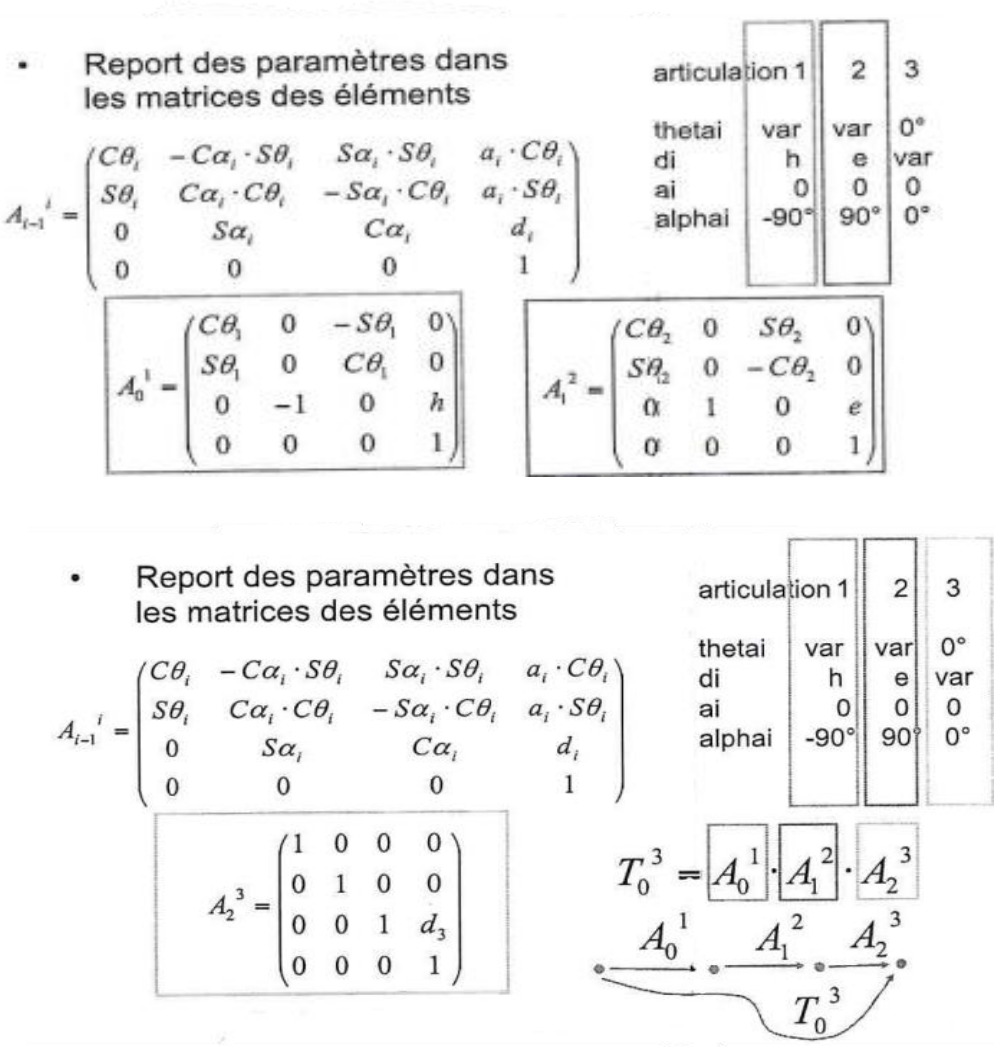


FIGURE 12 LES PARAMETRES DE D-H POUR LES REPÈRES DU MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT A 3DDL

II-2-1) - Rapport des paramètres dans les matrices des éléments :



II-3) - Modèle géométrique inverse

Algorithme du MGI du robot RRP [2].

II-3-1) - Les paramètres d'entrée de l'algorithme :

- Px, Py et Pz sont les cordonnées cartésiens de la position de l'outil.

(Ils sont pris de la 4ème colonne de la matrice ${}^0T_3$ du MGD)

Les paramètres de calcul (paramètres géométrique du robot) :

- h et e. Représentent la hauteur du 1er segment et l'épaisseur du disque de la 2ème articulation.

(Ces deux paramètres sont connus)

Les paramètres de sorties de l'algorithme :

- θ_1, θ_2 et d_3. Sont les positions angulaires et de translation des 3 articulations du robot.

II-3-2) - Les différentes étapes de calcul de l'algorithme :

1. Calcul de la position de la 1ère articulation θ_1 :

$$ph = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$$rh = \sqrt{ph^2 - e^2}$$

$$e^2 = ph^2 + rh^2 - 2ph \times rh \times \cos\alpha$$

$$\alpha = arc\cos^{-1}\left(\frac{e^2 - ph^2 - rh^2}{2ph \times rh}\right)$$

$$\beta = arc\tan 2\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta \qquad \text{(II-1)}$$

2. Calcul de la position de la 2ème et la 3ème articulation θ_2 et d_3 :

$$r_v = P_Z - h$$

$$\theta_2 = \arctan 2\left(\frac{rv}{rh}\right) \qquad \text{(II-2)}$$

$$d_3 = \sqrt{rh^2 + rv^2} \qquad \text{(II-3)}$$

II-4) - Modèle dynamique du robot à 3ddl :

II-4-1) - Établissement du modèle de robot à trois degrés de liberté :

Considérons maintenant un robot à trois degrés de liberté de type **RRP**, nous allons établir le modèle dynamique de ce système en utilisant les équations de Lagrange. Ce formalisme qui le plus classique et aisé à mettre en œuvre que nous allons rappeler ici [7].

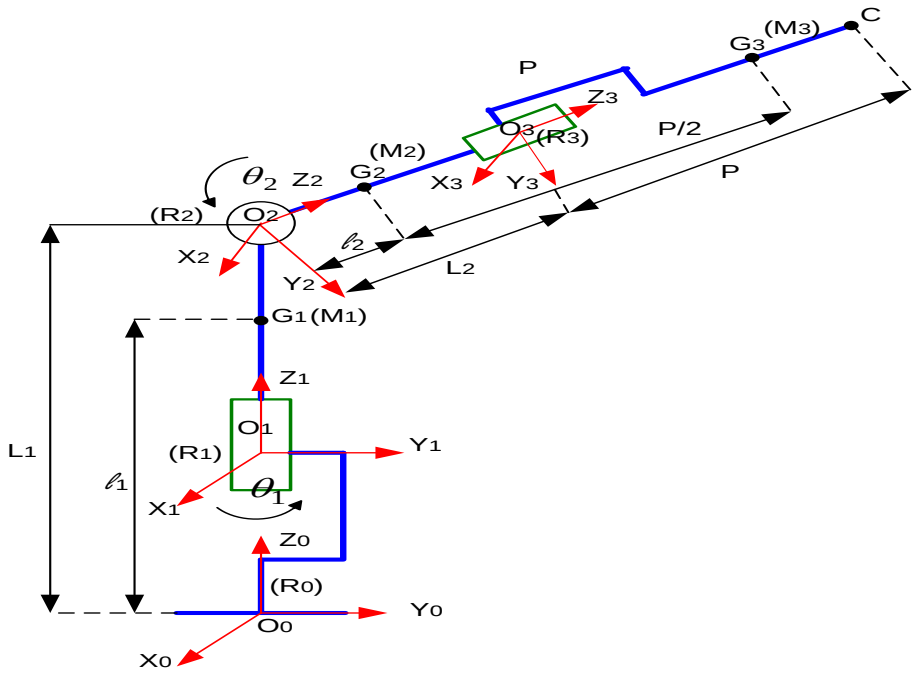


FIGURE 13 ROBOT A TROIS DEGRÉS DE LIBERTÉ RRP [16]

Le système d'équations de Lagrange le plus général s'écrit :

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \dfrac{\partial L}{\partial \theta_i} = Q_i + \Gamma_i \\ \\ i = 1\ldots,\ldots N \end{cases} \qquad \text{(II-4)}$$

Donc : système de N équations dans lesquelles :

- N est le nombre de corps, égal au nombre de ddl
- L est le Lagrangien.
- $\dot{\theta}_i = \dfrac{d\theta_i}{dt}$ est la vitesse articulaire i
- θ_i est le ddl ou la variable articulaire i
- Q_i est le couple de pesanteur s'exerçant sur l'articulation i
- Γ_i est le couple des forces extérieures (couple actif) s'exerçant sur l'articulation i

Le Lagrangien L représente l'énergie réelle du système, soit la différence entre son énergie cinétique T et son énergie potentielle U .

$$L = T - U \qquad \text{(II-5)}$$

Dans notre cas l'énergie cinétique de chaque corps se décompose en deux parties :

L'énergie cinétique de rotation qu'on notera $T_\lambda^{(R)}$ qui implique la vitesse de rotation $\Omega_\lambda^0(R_\lambda)$du repère R_λ lié au segment λ par rapport au repère R_0 .

Le calcul se déroule de la manière suivante :

II-4-2)- Les matrices de rotation :

Articulation θ_1 : Rot (Z,θ_1) : $A_0^1 = \begin{pmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Articulation θ_2 : Rot (X,θ_2) : $A_1^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & S_2 \\ 0 & -S_2 & C_2 \end{pmatrix}$

Articulation P : Tr (Z,P): $A_2^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

où : $C_1 = cos\,\theta_1$, $S_1 = sin\theta_1$, $C_2 = cos\,\theta_2$ et $S_2 = sin\theta_2$

II-4-3)- Les données sur les vitesses angulaires :

$\Omega_1^0(R_1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix}$; $\Omega_2^1(R_2) = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$; $\Omega_3^2(R_3) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Puisque c'est une translation

II-4-4)- Calcul de l'énergie cinétique totale T :

$$2T = 2T^{(R)} + 2T^{(T)}$$
$$= \dot{\theta}_1^2\left[\left[M_2\ell_2^2 + M_3(L_2 + P/2)^2 + I_{22}^{(2)} + I_{22}^{(3)}\right]S_2^2 + \left[I_{33}^{(2)} + I_{33}^{(3)}\right]C_2^2 + \left[I_{23}^{(2)} + I_{23}^{(3)} + I_{32}^{(2)} + I_{32}^{(3)}\right]S_2 C_2 + I_{33}^{(1)}\right]$$
$$+ \dot{\theta}_2^2\left[M_2\ell_2^2 + M_3(L_2 + P/2)^2 + I_{11}^{(2)} + I_{11}^{(3)}\right] + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left[\left[I_{12}^{(2)} + I_{12}^{(3)} + I_{21}^{(2)} + I_{21}^{(3)}\right]S_2 + \left[I_{13}^{(2)} + I_{13}^{(3)} + I_{31}^{(2)} + I_{31}^{(3)}\right]C_2\right]$$
$$+ M_3\dot{P}^2$$

En remplaçant tous les termes constants par d'autres pour simplifier l'écriture qui deviendra comme suite :

On pose :

$$a = \frac{1}{4} M_3$$

$$b = M_3 L_2$$

$$c = M_2 \ell_2^2 + M_3 L_2^2 + I_{22}^{(2)} + I_{22}^{(3)}$$

$$d = I_{33}^{(2)} + I_{33}^{(3)}$$

$$e = I_{23}^{(2)} + I_{23}^{(3)} + I_{32}^{(2)} + {}_{32}^{(3)}$$

$$f = I_{33}^{(1)}$$

$$h = M_2 \ell_2^2 + M_3 L_2^2 + I_{11}^{(2)} + I_{11}^{(3)}$$

$$j = I_{12}^{(2)} + I_{12}^{(3)} + I_{21}^{(2)} + I_{21}^{(3)}$$

$$k = I_{13}^{(2)} + I_{13}^{(3)} + I_{31}^{(2)} + I_{31}^{(3)}$$

$$m = M_3$$

Alors on peut écrire :

$$2T = \dot{\theta}_1^2 \left[\left(aP^2 + bP + c \right) S_2^2 + d\, C_2^2 + e\, S_2 C_2 + f \right] + \dot{\theta}_2^2 \left[aP^2 + bP + h \right] + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \left[j\, S_2 + k\, C_2 \right] + m \dot{P}^2$$

II-4-5)- Calcul de l'énergie potentielle totale U :

$$U = M_1 g\, \ell_1 + M_2 g \left(L_1 + \ell_2\, S_2 \right) + M_3 g \left(L_2 + P\, S_2 \right)$$

$$2L = 2T - 2U = \dot{\theta}_1^2 \left[\left(aP^2 + bP + c \right) S_2^2 + d\, C_2^2 + e\, S_2 C_2 + f \right] + \dot{\theta}_2^2 \left[aP^2 + bP + h \right] + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \left[j\, S_2 + k\, C_2 \right]$$
$$+ m \dot{P}^2 - 2 M_1 g\, \ell_1 - 2 M_2 g \left(L_1 + \ell_2\, S_2 \right) - 2 M_3 g \left(L_2 + P\, S_2 \right)$$

Calcul de $\frac{\partial L}{\partial \theta_i}$:

$$2 \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0$$

$$2 \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \dot{\theta}_1^2 \left[2 \left(aP^2 + bP + c - d \right) S_2\, C_2 + e \left(C_2^2 - S_2^2 \right) \right] + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \left[j\, C_2 - k\, S_2 \right] - 2\, g\, C_2 \left[M_2\, \ell_2 + M_3\, P \right]$$

Calcul de $\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}$:

$$2\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = 2\dot{\theta}_1\left[\left(aP^2 + bP + c\right)S_2^2 + d\,C_2^2 + e\,S_2\,C_2 + f\right] + \dot{\theta}_2\left[j\,S_2 + k\,C_2\right]$$

$$2\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = 2\dot{\theta}_2\left[\left(aP^2 + bP + h\right)\right] + \dot{\theta}_1\left[j\,S_2 + k\,C_2\right]$$

$$2\frac{\partial L}{\partial \dot{P}} = 2m\dot{P}$$

Calcul de $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right)$

Nous devons bien noter qu'il s'agit d'une différentielle totale.

$$2\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) = 2\ddot{\theta}_1\left[\left(aP^2 bP + c\right)S_2^2 + d\,C_2^2 + e\,S_2\,C_2 + f\right] + 2\,\dot{\theta}_1\left[2\,S_2\,C_2\left(aP^2 + bP + c\right)\dot{\theta}_2\right.$$
$$\left. + \left(2aP\dot{P} + b\dot{P}\right)S_2^2 - 2\,d\,S_2\,C_2\,\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2\,e\left(C_2^2 - S_2^2\right)\right] + \ddot{\theta}_2\left[j\,S_2 + k\,C_2\right] + \dot{\theta}_2^2\left[j\,C_2 - k\,S_2\right]$$

$$2\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right) = 2\ddot{\theta}_2\left[\left(aP^2 + bP + h\right)\right] + 2\dot{\theta}_2\left[2aP\dot{P} + b\dot{P}\right] + \ddot{\theta}_1\left[j\,S_2 + k\,C_2\right] + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left[j\,C_2 - k\,S_2\right]$$

$$2\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{P}}\right) = 2m\ddot{P}$$

On écrit $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}$ pour chaque θ_i

Pour θ_1 :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \ddot{\theta}_1\left[\left(aP^2 + bP + c\right)S_2^2 + d\,C_2^2 + e\,S_2\,C_2 + f\right] + \frac{\ddot{\theta}_2}{2}\left[j\,S_2 + k\,C_2\right] + \frac{\dot{\theta}_2^2}{2}\left[j\,C_2 - k\,S_2\right]$$
$$+ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left[2\left(aP^2 + bP + c - d\right)S_2C_2 + e\left(C_2^2 - S_{22}\right)\right] + \dot{\theta}_1\dot{P}\left[\left(2aP + b\right)S_2^2\right]$$

Pour θ_2

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right)-\frac{\partial L}{\partial \theta_2}= \quad \frac{\ddot{\theta}_1}{2}\left[\, j\,S_2 + k\,C_2 \,\right]+\ddot{\theta}_2\left[aP^2+bP+h\right]$$

$$-\frac{\dot{\theta}_1^2}{2}\left[2\left(\; aP^2+bP+c-d \;\right)S_2C_2+e\left(C_2^2-S_2^2\right)\right] \;+\; \dot{\theta}_2\,\dot{P}\left[2aP+b\right]+g\,C_2\left[M_2\,\ell_2+M_3\,P\right]$$

Pour P :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{P}}\right)-\frac{\partial L}{\partial P} \;=\; m\ddot{P}-\frac{\dot{\theta}_1^2}{2}\left[(2aP+b)S_2^2\;\right]-\frac{\dot{\theta}_2^2}{2}\left[(2\,aP+b)\right]+M_3 g\,S_2$$

Calcul du couple Q_i de pesanteur s'exerçant sur l'articulation i

$$Q_i=\sum_{\lambda=1}^{N} g\,M_\lambda\frac{\partial Z_{G_\lambda}^0}{\partial \theta_i} \qquad \text{(II-6)}$$

Où :

g : Accélération de la pesanteur

M_λ : Masse du corps λ

$Z_{G_\lambda}^0$: représente l'altitude du centre de masse M_λ, dans le repère de référence

$Z_{G_1}^0 = \;\ell_1$

$Z_{G_2}^0 = \;L_1+\ell_2 C2$

$Z_{G_3}^0 = \;L_1+\left(\;L_2+P/2\;\right)C2$

$$Q_1=g\,M_1\frac{\partial Z_{G_1}^0}{\partial \theta_1}+g\,M_2\frac{\partial Z_{G_2}^0}{\partial \theta_1}+g\,M_3\frac{\partial Z_{G_3}^0}{\partial \theta_1} \;=\; 0$$

$$Q_2=g\,M_1\frac{\partial Z_{G_1}^0}{\partial \theta_2}+g\,M_2\frac{\partial Z_{G_2}^0}{\partial \theta_2}+g\,M_3\frac{\partial Z_{G_3}^0}{\partial \theta_2} \;=\; 0\; -g\,M_2\ell_2 S2-g\,M_3\left(\;L_2+P/2\;\right)S2$$

$$Q_3=g\,M_1\frac{\partial Z_{G_1}^0}{\partial P}+g\,M_2\frac{\partial Z_{G_2}^0}{\partial P}+g\,M_3\frac{\partial Z_{G_3}^0}{\partial P} \;=0+0+g\,M_3 C2/2$$

Maintenant nous pouvons écrire l'équation du modèle :

$$\Gamma_1=\ddot{\theta}_1\left[\left(aP^2+bP+c\right)S_2^2+d\,C_2^2+e\,S_2C_2+\;f\;\right]+\frac{\ddot{\theta}_2}{2}\left[\,j\,S_2+k\,C_2\right]+\frac{\dot{\theta}_2^2}{2}\left[\;jC2-kS2\right]$$

$$+\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left[\ 2\left(aP^2+bP+c\right)\ S2C2-2dS2C2+e\left(\ C2^2-S2^2\ \right)\right]+\dot{\theta}_1\dot{P}\ \left[\ \left(\ 2aP+b\ \right)S2^2\ \right]$$

$$\Gamma_2\ \ -g\,M_2\,\ell_2-g\,M_3\left(L_2+P/2\right)S_2\ =\ \frac{\ddot{\theta}_1}{2}\left[\,j\,S_2+k\,C_2\,\right]+\ddot{\theta}_2\left[aP^2+bP+h\,\right]$$

$$-\frac{\dot{\theta}_1^2}{2}\left[2\,\left(aP^2+bP+c-d\,\right)S_2\,C_2+e\left(C_2^2-S_2^2\right)\right]$$

$$+\ \dot{\theta}_2\,\dot{P}\left[\,2aP+b\,\right]+gC_2\left[M_2\,\ell_2+M_3\,P\right]$$

$$\Gamma_3+\ g\,M_3\,C_2/2\ =\ m\,\ddot{P}\ -\frac{\dot{\theta}_1^2}{2}\left[\left(2aP+b\right)S_2^2\right]-\frac{\dot{\theta}_2^2}{2}\left[\left(2aP+b\right)\right]+g\,M_3S_2$$

II-4-6- Équation du modèle dynamique sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix}\Gamma_1\\ -g\,M_2\,\ell_2-g\,M_3\left(L_2+P/2\right)S_2+\Gamma_2\\ g\,M_3\,C_2/2+\Gamma_3\end{pmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix}\left(aP^2+bP+c\right)S_2^2+d\,C_2^2+e\,S_2C_2+\ f & \frac{1}{2}\left(j\,S_2+k\,C_2\right) & 0\\ \frac{1}{2}\left(j\,S_2+k\,C_2\right) & aP^2+bP+h & 0\\ 0 & 0 & m\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\ddot{\theta}_1\\ \ddot{\theta}_2\\ \ddot{P}\end{pmatrix}$$

$$+\begin{pmatrix}0 & \frac{1}{2}\left(j\,S_2-k\,C_2\right) & 0\\ -\left(aP^2+bP+c-d\right)S_2C_2+\frac{e}{2}\left(C_2^2-S_2^2\right) & 0 & 0\\ -\left(aP+b/2\right)S_2^2 & -\left(aP+b/2\right) & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{\theta}_1^2\\ \dot{\theta}_2^2\\ \dot{P}^2\end{pmatrix}\qquad\text{(II-7)}\qquad+$$

$$\begin{pmatrix}2\left(aP^2+bP+c-d\right)S_2C_2+\frac{e}{2}\left(C_2^2-S_2^2\right) & \left(2\,aP+b\right)S_2^2 & 0\\ 0 & 0 & 2\,aP+b\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{\theta}_1\,\dot{\theta}_2\\ \dot{\theta}_1\,\dot{P}\\ \dot{\theta}_2\,\dot{P}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\ g\,C_2\left(M_2\,\ell_2+M_3\,P\right)\\ g\,M_3S_2\end{pmatrix}$$

Qui bien de la forme.

$$M\ddot{\theta}+B\dot{\theta}^2+C\dot{\theta}\dot{\theta}=Q+\Gamma\qquad\text{(II-8)}$$

Nous pouvons à partir de ce modèle obtenir le modèle dynamique direct qui va nous servir pour les simulations, après calculs et simplifications, le modèle direct de ce robot manipulateur est donné par :

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_1 = \dfrac{\theta_1 - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\left(aP^2+bP+c\right)\sin(\theta_2)\cos(\theta_2) - \dot{\theta}_1\dot{P}(aP+b)\sin^2(\theta_2)}{\left(aP^2+bP+c\right)\sin^2(\theta_2)} \\ \ddot{\theta}_2 = \dfrac{\theta_2 + \dot{\theta}_1^2\left(aP^2+bP+c\right)\sin(\theta_2)\cos(\theta_2) - \dot{\theta}_2\dot{P}(aP+b) - g\left(2\left(\sin(\theta_2)+\cos(\theta_2)\right)+mP\left(0.5\sin(\theta_2)+\cos(\theta_2)\right)+b\sin(\theta_2)\right)}{\left(aP^2+bP+c\right)} \\ \ddot{P} = \dfrac{\theta_3 + 2\dot{\theta}_1^2(aP+0.5b)\sin^2(\theta_2) + 2\dot{\theta}_2^2(aP+0.5b) - 3gm\sin(\theta_2)}{2m} \end{cases}$$

Remarque :

En dépit de la simplicité de ce modèle, on se rend compte que les calculs sont, fastidieux et avec des risques d'erreur. Il a fallu plusieurs jours pour établir les équations dynamiques à la main. Il existe maintenant des programmes sur ordinateur qui font ces calculs en quelques secondes ou minutes. Malgré la complexité des calculs, le modèle obtenu est-il suffisamment plus proche de la réalité concrète que les modèles géométriques et cinématiques de telle sorte que les embarras liés à son utilisation soient compensés par un meilleur comportement du robot.

II-5. Conclusion :

Dans ce chapitre a présenté des développements mathématiques afin de décrire le mouvement d'un manipulateur en trois dégrée de liberté (3ddl) ; on a utilisé le théorème Denavit-Hartenberg pour présenter le modèle géométrique direct tandis que le modèle géométrique inverse est présenté par la méthode de Paul. Ensuite, le modèle cinématique direct est trouvé en calculant les vitesses angulaires et les vitesses linéaires correspondantes.

Chapitre III : Commande Par Modes Glissant Et Théorie Des Observateurs

III-1 Introduction :

La commande non linéaire par mode de glissement est rendue très populaire auprès des automaticiens, grâce à sa simplicité d'implémentation et à sa grande robustesse vis-à-vis les incertitudes paramétriques, les erreurs de modélisation et les perturbations. Depuis sa formalisation dans les années 50, plusieurs travaux effectués sur cette commande non linéaire figurent dans la littérature. Néanmoins, l'existence d'une partie discontinue dans la loi de commande engendre des signaux à haute fréquence qui peuvent exciter des dynamiques indésirables sur le système. Ces signaux proviennent du fait que les commutations de la partie discontinue de la commande ne sont pas instantanées; et la surface de glissement n'est pas rigoureusement connue en réalité. Or, plusieurs solutions ont été proposées à cet effet dans la littérature scientifique, dans le but de diminuer 1' effet des commutations. Dans ce chapitre, nous allons exposer les travaux les plus connus qui ont été menés en littérature sur la commande par mode de glissement. Ces travaux concernent surtout la réduction des commutations et 1' amélioration de la robustesse et des performances de la commande par mode de glissement

III.2. Historique de la commande par mode glissant :

La théorie des systèmes à structure variable fait l'objet de multiples études depuis une cinquantaine d'années. Les premiers travaux sur ce type de systèmes sont ceux des chercheurs dans l'ancienne URSS, ou ceux en France, sur la commande à relais. Ces recherches ont connu un nouvel essor à la fin des années soixante-dix lorsque Emelyanov, Utkin et reprit par Wissama & all [7], introduit la théorie des modes glissants. à partir des résultats des études du mathématicien Filipov [6] sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris ailleurs tant au Etats Unies par Slotine, Spong M.W. et M. Vidyasagar. [4]

Actuellement, cette technique de commande connaît une large gamme d'applications dans des domaines très variés tels que la robotique, la mécanique et l'électrotechnique. L'algorithme de commande par mode de glissement est classifié dans les systèmes de contrôle à structure variable VSS (Variable Structure System dans la littérature anglo-saxonne) [10].

Le principe de ce type de commande consiste à amener, quelles que soient les conditions initiales, le point représentatif de l'évolution du système sur une hyper surface de l'espace de phase représentant un ensemble de relations, statiques, entre les variables d'état.
La surface considérée est alors désignée comme étant la *surface de glissement ou de commutation.* Le comportement dynamique résultant, appelé régime glissant idéal, est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface. L'avantage d'obtenir un tel comportement est

double : d'un côté, on a une réduction de l'ordre du système, et d'autre part, le régime glissant insensible aux perturbations intervenant dans les mêmes directions que les entrées (*matching perturbations*) [10].

III-3 Les systèmes à structure variable en mode glissant :

Un système à structure variable est un système dont sa structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par un choix d'une fonction de commutation.

Dans les systèmes à structure variable avec mode glissant, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan), puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement dans laquelle se produit le mouvement qu'on appellera mouvement de glissement. La trajectoire dans le plan de phase (système deuxième ordre) est constituée de trois modes distinctes (Figure III-1):

- **Le mode de convergence (MC) :** Durant lequel la variable à régler se déplace de n'importe quel point initial dans le plan de phase est tend vers la surface de commutation $S(x, y) = 0$.Ce mode est caractérisé par la loi de commande et critère de convergence.

- **Le mode de glissement (MG) :** Durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y)$.

- **Le mode du régime permanent (MRP) :** Il 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.

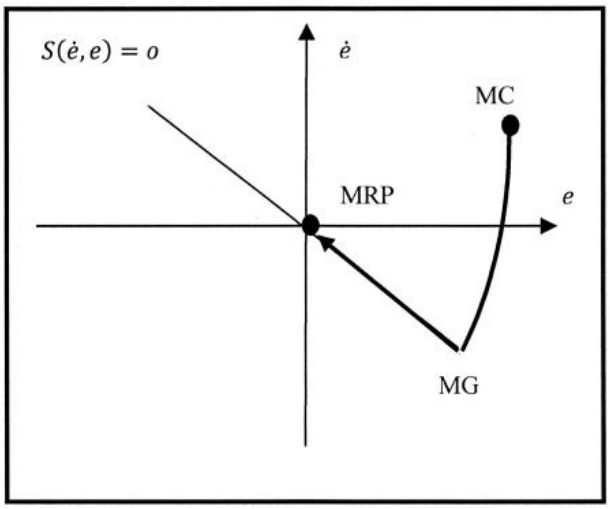


FIGURE 14 DIFFÉRENTS MODES POUR LA TRAJECTOIRE DANS LE PLAN PHASE

III-4 Conception de la commande par mode glissant :

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples comme la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties, une première commande continue représentant la dynamique de système durant le mode de glissement et une autre discontinue représentant la dynamique de système durant le mode de convergence. Cette deuxième est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et de perturbation qui influent sur le modèle. **[12]**

La conception de la commande par mode glissant peut être devisée en trois étapes principales très dépendantes, ces étapes concernent :

- Choix de la surface.
- Etablissement des conditions d'existence de convergence.
- Détermination de la loi de commande.

III-4-1 Choix de la surface de glissement (S) :

La fonction S est appelée par abus de langage surface, cette dernière peut être une droite ou une hyper surface selon l'ordre du système à commander.

Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des

surfaces de glissement dans le plan de phase, Figure (III-2) **[13]**, dont le but est d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur désirée x^d. Cette fonction est donnée par l'équation :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + k \right)^{r-1} e(x) \qquad \text{(III-1)}$$

Cette surface est d'usage très pratique car elle minimise le nombre des paramètres de synthèse de la surface (un seul coefficient) **[19].**

Ou : $e(x)$: L'écart entre la variable à régler x et la variable désirée x^d.

k : Un coefficient positif qui représente la pente de la surface de glissement.

r : Le degré relatif du système, qui représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

III-4-1-1 Degré relatif et choix de la surface de glissement :

Le but de ce paragraphe est de montrer le lien entre le degré relatif du système et le choix de la surface de glissement pour la synthèse de la loi de commande. L'erreur de poursuite est défini comme étant $(t) = y(t) - y_r(t)$, où $y(t)$ est la sortie du système et $y_r(t)$ est le signal de référence.

On définit le degré relatif du système par rapport à la sortie $y(t)$comme étant le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $y(t)$par rapport au temps, pour avoir apparaître l'entrée de manière explicite [10]**.**

Si r est égal à 1, il est facile de déterminer la commande de commutation qui assure que la sortie a le comportement désiré $y_r(t)$. Pour cela on choisit la surface de glissement

$S(t) = y(t) - y_r(t)$.

Si r est égal à 2, on pose $\Delta y = y - y_r$ et on choisit la surface

$$S(t) = K\ (y - y_r) + \frac{d}{dt}(y - y_r)$$

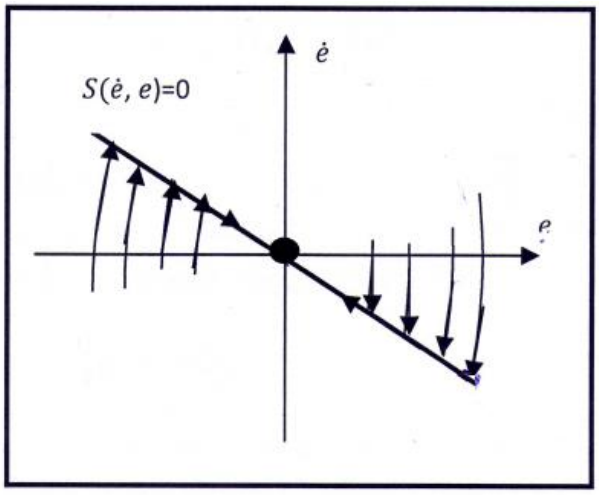


FIGURE 15 SURFACE DE GLISSEMENT

III-4-2 Condition d'existence de convergence :

Les conditions d'existence de convergences sont les critères qui permettent en dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment à la perturbation. Il y'a deux considération correspondes au mode convergence de l'état du système.

III-4-2-1 Fonction directe de commutation :

Cette première condition de convergence (attractivité) a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin [**4][7]**. Il s'agit de donner, à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est formulée par :

$s(x) > 0$ Lorsque $s(x) < 0$

$\dot{s}\,(x) < 0$ Lorsque $s(x) > 0$

Cette condition peut être donnée autrement par :

$$\dot{s}\,(x)s(x) < 0 \qquad \text{(III-2)}$$

III-4-2-2 Fonction de Lyapunov :

La détermination du domaine de glissement peut se ramener à l'étude de la stabilité du système en régime glissant. Cette étude est basée sur l'utilisation de la fonction de Lyapunov.

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $(V(x) >)$pour les variables

d'états de système et la loi de commande doit faire décroitre cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$). L'idée de base est de choisir une fonction scalaire $s(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de construire une commande U tel que le carrée de la surface correspond à une fonction de Lyapunov qui est définie par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad \text{(III-3)}$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x) s(x) \quad \text{(III-4)}$$

Pour que la fonction $V(x)$ décroisse, il faut s'assurer que sa dérivée est négative. Ceci n'est permis que si la condition (IV-2) est vérifiée. L'équation (IV-3) explique que le carrée de la distance vers la surface mesurée par $s^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés.

III-4-3 Détermination de la commande :

La commande comprend en générale deux termes **[13]** :

$$(U = U_{eq} + U_n) \quad \text{(III-5)}$$

Avec :

U_{eq} : est un terme continu, appelé commande équivalente ;

U_n: est un terme discontinu, appelé commande de commutation.

III-4-3-1 Commande équivalente :

La méthode qui a été proposée par Utkin consiste à admettre qu'en mode de glissement tout se passe comme si le système était piloté par une commande dite commande équivalente. Cette dernière correspondant au régime glissant idéal, pour lequel non seulement le point de fonctionnement reste sur la surface mais aussi pour lequel la dérivée de la fonction de la surface reste nulle $\dot{S}$=0 (c'est-à-dire surface invariante dans le temps) **[13]**.

III-4-3-2 Commande de commutation :

La commande de commutation impose au point de fonctionnement de rester au voisinage de la surface. Cette commande a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité.

$$U_n = -\lambda \operatorname{sign}(s) \qquad \text{(III-6)}$$

Le gain λ est choisit pour garantir la stabilité, la rapidité et pour vaincre les perturbations extérieures agissant sur le système.

Le signe «-» indique le rappel de point de fonctionnement vers la surface à tout instant de fonctionnement. **[15]**

La fonction $sign(S(x,t)$ est définie par :

$$sign(S(x,t)) = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad S > 0 \\ -1 & \text{si} \quad S < 0 \end{cases} \qquad \text{(III-7)}$$

L'utilisation de la fonction $sign$, donnée par Figure (**III-2**), signifie que la commande U_n commute entre deux valeur +/- λ .

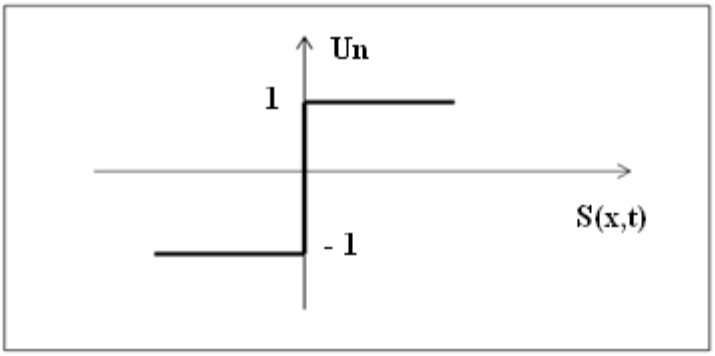


FIGURE 16 REPRESENTATION DE LA COMMANDE DISCONTINUE

Donc la structure d'un contrôleur par mode glissant se compose de deux parties la linéarisation (U_{eq}) et l'autre stabilisante

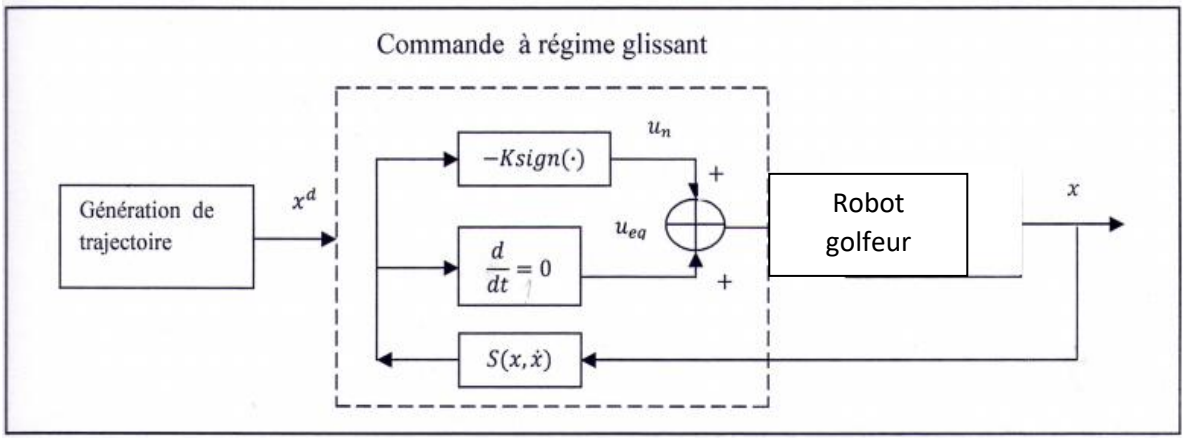


FIGURE 17 SCHÉMA DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT

III-5 Synthèse de la loi de commande par mode glissant :

Considérons le système définit dans l'espace d'état par l'équation suivante :

$$\dot{x(t)}=A(x,t)+B(x,t)).\,U(t) \qquad \text{(III-8)}$$

Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande par mode glissant.

Posons la surface choisie$s(x,t)$, et sa dérivée est la suivante :

$$\dot{S}(x,t)=\frac{dS}{dt}=\frac{dS}{dx}.\frac{dx}{dt} \qquad \text{(III-9)}$$

Par substitution de l'équation (IV-8) dans (IV-9), et en utilisant l'équation (III-5), nous obtenons :

$$\dot{S}(x,t)=\frac{dS}{dx}\,[A(x,t).\mathrm{x}+B(x,t).U_{eq}\,]+\frac{dS}{dx}.B(x,t).U_n \qquad \text{(III-10)}$$

Sachant que la surface est nulle pendant le régime de glissement et le régime permanent, la dérivée de la surface et la partie discontinue u_n sont aussi nulles :

$$\begin{cases} U_n = 0 \\ \dot{S}(x,t) = 0 \end{cases} \qquad \text{(III-11)}$$

L'expression de la commande équivalente peut être déduite en remplaçant l'équation (III-11) dans (III-10). Ce qui donne:

$$U_{eq}= \quad -(\frac{dS}{dx}.\mathrm{B(x,t)})^{-1} \ \frac{dS}{dx}.\mathrm{A(x,t)} \qquad \text{(III-12)}$$

Afin que la commande équivalente existe, la surface doit remplir la condition suivante :

$$\frac{dS}{dx}.\mathrm{B(x,t)} \neq 0 \qquad \text{(III-13)}$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression dans l'équation (III-10). Nous obtenons une nouvelle expression de $\dot{S}(x,t)$:

$$\dot{S}(x,t) = \frac{dS}{dx}.B(x,t).U_n \qquad \text{(III-14)}$$

La condition d'attractivité (IV-2) devient :

$$S(x,t).\frac{dS}{dx}.B(x,t).U_n < 0 \qquad \text{(III-15)}$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé du signe de $S(x,t).\frac{\partial S}{\partial x}B(x,t)$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discontinue U_n est celle d'un relais donnée par équation (IV-6) avec le signe de λ doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x}B(x,t)$.

III-5-1 Phénomène de réticence (chattering) :

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas étant donné que cela impliquerait que l'utilisation de la fonction $sign$ signifie que la commande U_n commute entre deux valeurs $\pm\lambda$ avec une fréquence infinie.

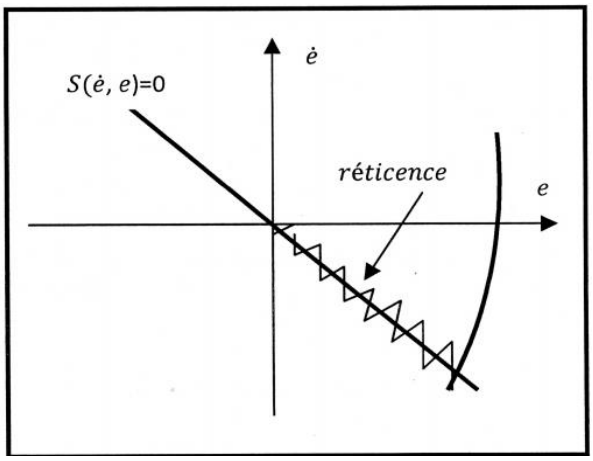


FIGURE 18 PHÉNOMÈNE DE CHATTERING

De par la présence d'imperfections ou de limites technologiques et physiques, tels que des retards au niveau des commutations ou de petites constantes de temps au niveau des actionneurs, le caractère discontinu de la commande engendre un comportement dynamique particulier au voisinage de la surface qui est communément appelé chattering, en anglais, ou encore réticence ou broutement, en français, (Figure III-5). Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations autour de la surface.

Quand la commande U_n commute entre deux valeurs $\pm\lambda$ avec une fréquence théoriquement infinie. Ce qui cause un phénomène dit broutement (Chattering).

III-5-2 Solutions pour la suppression du phénomène de réticence :

Le phénomène de réticence constitue l'inconvénient majeur non négligeable de la commande par mode glissant puisque il peut provoquer une détérioration anticipée de l'organe de commande ou exciter des dynamiques hautes fréquences non considérées dans la modélisation du système. Ceci peut dégrader les performances et même conduire au problème d'instabilité.

Le phénomène de chattering revient à ce que la commande de commutation ne commute pas infiniment rapidement. Cependant, il est possible Dr réduire ou d'éliminer ce phénomène par :

- La modification de la fonction signe par une fonction plus lisse telles que celles représentées par Figure (III-6) ;
- L'utilisation d'une commande composée de deux commandes, celle discontinue avec celle appelée commande équivalente.
- L'utilisation d'une commande par mode glissant d'ordre supérieur.

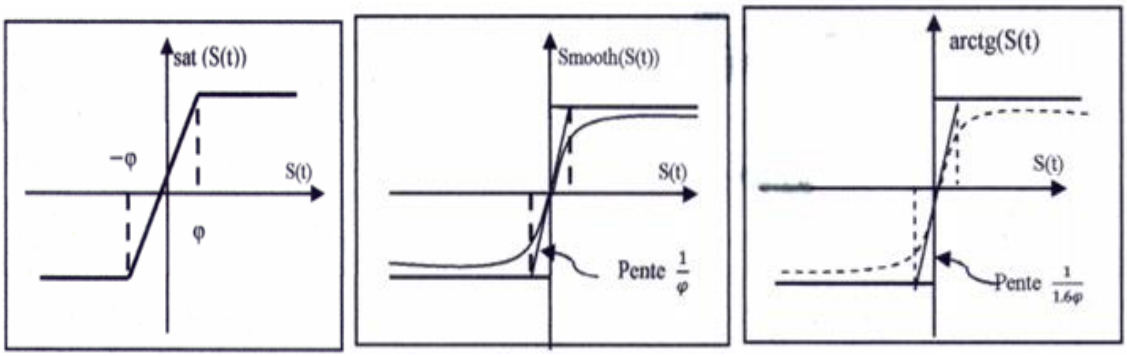


FIGURE 19 FONCTIONS DE COMMUTATION

(a) (b) (c)

Dans notre travail nous sommes optés pour les deux premières solutions c'est-à-dire :

Nous avons changé la fonction signe par la fonction Smooth qui est une fonction plus lisse donnée par Figure **(**IV-6-b**)** et nous avons considéré aussi une commande composée de deux commandes, à savoir celle de commutation en plus de celle équivalente.

III-6) Théorie des observateurs :

On définit un observateur d'état, comme étant un système dynamique qui permet de reconstruire ou d'estimer les variables non mesurées du système dynamique à partir des entrées et des sorties du système .les entrées de l'observateur sont constituées des entrées et des sorties-du système (processus), et la sortie de l'observateur constitue l'état estimé.

Pour illustrer un tel observateur voire le schéma de la figure :

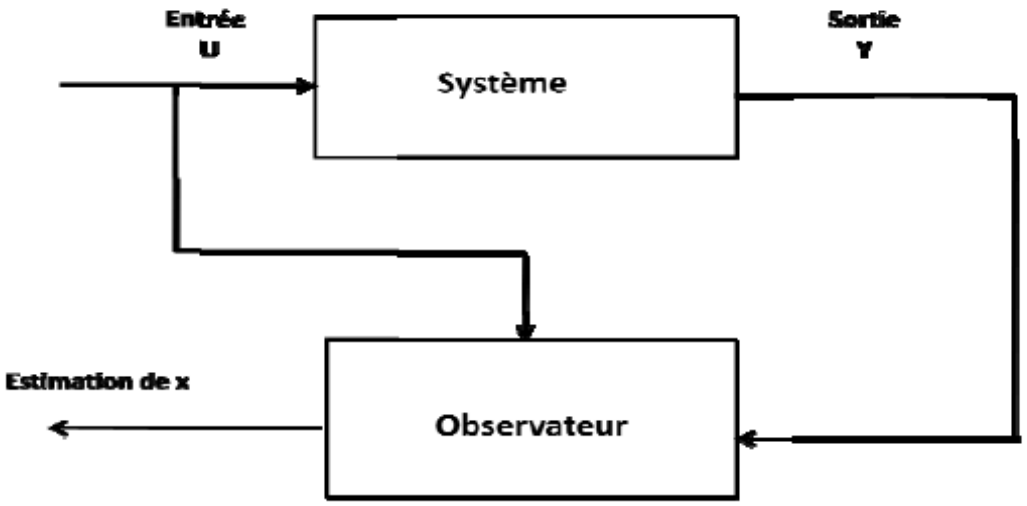


FIGURE 20 Schéma d'un observateur d'état en boucle ouverte

Il existe de nombreuses techniques d'observation, en fonction du système considéré.

Elles peuvent être classées en deux grandes catégories:

- Méthodes pour les systèmes linéaires.
- Méthodes pour les systèmes non- linéaires.

Pour un système linéaire, deux grandes familles d'observateurs se distinguent:

- Observateurs de type déterministe *(Luenberger).*
- Observateurs basés sur le filtrage stochastique de *Kalman*.

Pour les systèmes non- linéaires, il existe une grande richesse de méthodes, on peut énoncer par exemple:

- Observateurs ou les gains de correction sont calculés à partir d'une analyse de stabilité Par la méthode de Lyapunov.
- Observateurs à structure variable (Modes Glissants).
- Observateurs à grand gain.
- Observateur par Backstepping.

III-6-1) - Observabilité :

L'observabilité d'un processus est un concept très important dans le domaine d'estimation de l'état. En effet, pour reconstruire les états inaccessibles d'un système, il faut savoir, a priori, si les variables d'état sont observables ou non. L'observabilité d'un système est la propriété qui permet de dire si l'état peut être déterminé uniquement à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties. Dans le des systèmes non linéaires, la notion d'observabilité est liée aux entrées (via la notion d'entrée uniforme) et aux conditions initiales.

III-6-1-1)- Observabilités des systèmes linéaires :

Pour les systèmes linéaires stationnaires on a :

$$S=\begin{cases}\dot{x} = A(x) + B(u)\\ y(t) = C(x)\end{cases} \qquad (3.6)$$

Où les vecteurs $x(t)$, $u(t)$, $y(t)$ représentent respectivement l'état, la commande et la sortie du système.

Avec : $A \in \mathrm{R}^{n*n}$, $C \in \mathrm{R}^{1*n}$, $B \in \mathrm{R}^{n*p}$

On a le critère bien connu d'observabilité pour les systèmes linéaire :

$$S \text{ est observable} \leftrightarrow rang\begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ . \\ . \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} = n \qquad (3.7)$$

Qui repose sur le fait que l'espace d'observabilité est dans ce cas engendré par les vecteurs (C, CA, …., CA^{n-1}).

Si le système linéaire *S* est complètement observable, il est globalement observable, c'est-à dire que toutes les composantes du vecteur d'état du système sont observables, et donc peuvent être reconstruites par un observateur.

III-6-2- Observateur de Luenberger :

III-6-2-1)- Rappel :

L'objectif est de reconstruire l'état interne d'un système à l'aide d'un algorithme dynamique (un système dynamique). Ce dernier dispositif est appelé observateur.

Soit le système :

$$\begin{cases}\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)\\ y(t) = \mathrm{C}x(t)\end{cases}$$

Dont nous voulons observer (on dit aussi recalculer) $x(t)$. L'observateur est un système dynamique qui s'écrit :

$$\begin{cases}\dot{z}(t) = Fz(t) + Ly(t) + Hu(\mathrm{t})\\ \hat{x}(t) = Mz(t) + Ny(t)\end{cases} \qquad (3.7)$$

Où $u(t)$, $y(t)$ sont respectivement l'entrée et la sortie du système. Remarquons que ce sont également les deux entrées de l'observateur. La sortie de l'observateur est la variable $\hat{x}(t)$.

On définit un signal d'erreur $e(t)$ comme suit : $Z(t) = Tx(t) + e(t)$. (3.8)

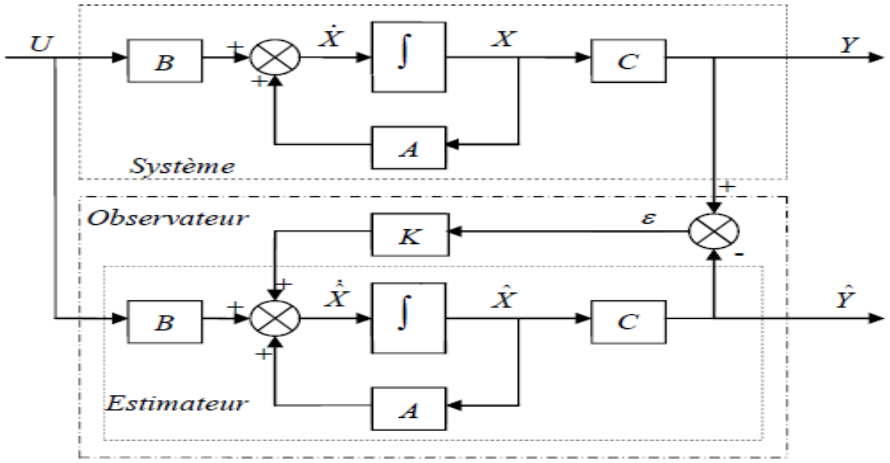


FIGURE 21 : Schéma d'un observateur d'état de Luenberger.

L'objectif est de construire l'observateur c'est à dire de choisir convenablement F, L,H,M,N,T telle que $\lim_{t\to\infty} \hat{x}(t) - x(t) = 0$. D'autre part, nous voulons également contrôler la manière dont l'erreur tend vers 0, c'est à dire le régime transitoire de l'erreur. Or, en utilisant l'expression de $z(t)$ et de $y(t)$, **on peut réécrire $x(t)$ de la maniéré suivante :**

$$\hat{x}(t) = (MT+NC)\, x(t)+Me(t) \quad (3.9)$$

Posons :

$$MT+NC = I \quad (3.10)$$

Il vient que $\hat{x}(t) = x(t)+Me(t)$. Si l'erreur converge asymptotiquement vers zéro, $\lim_{t\to\infty} e(t) = 0$, alors $\hat{x}(t)$ converge asymptotiquement vers $x(t)$. Calculons la dynamique de l'erreur, c'est à dire :

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \dot{z}(t) - T\dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) = Fe(t) + (FT + LC - TA)x(t) + (H - TB)u(t) \end{cases} \quad (3.11)$$

Imposons les relations suivantes :

$$FT + LC - TA = 0 \quad (3.12)$$

$$H = TB \quad (3.13)$$

Nous obtenons alors la relation $\dot{e}(t) = Fe(t)$.

La matrice F doit alors être choisie de manière à assurer la stabilité asymptotique de $e(t)$ et la convergence de $e(t)$vers 0. F est donc une matrice stable. Pour résumer, un observateur défini par le système dynamique (3.7) admet une erreur régie par $\dot{e}(t) = Fe(t)$

Si les équations matricielles suivantes sont vérifiées :

$$MT+NC= I$$

$$FT+L\ C-TA=0$$

$$H= TB$$

Il reste ensuite d'imposer que les valeurs propres de *F* soient à parties réelles négatives

Pour impliquer la stabilité asymptotique de l'erreur et la convergence vers 0 de $e(\mathrm{t})$.

III-6-3)- L'observateur Identité :

Afin de résoudre les équations matricielles, on choisit :

T =I, M =I, N =0

L'unique relation à résoudre est :

$$F= A - L\ C \qquad (3.14)$$

On obtient alors l'observateur identité :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + Ly(t) + Bu(\mathrm{t}) \\ \hat{x}(t) = z(t) \\ z(t) = x(t) + e(\mathrm{t}) \end{cases} \qquad (3.15)$$

Il faut ensuite déterminer le gain de l'observateur *L* tel que $F = A - L\ C$ soit une matrice stable. Ce calcul s'effectue en imposant le polynôme caractéristique de *F* (noté $P_{des}(\lambda)$) et en résolvant l'équation $P_{des}(\lambda) = P_{A-\ LC}(\lambda)$

Remarque : Celui-ci peut également s'écrire :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + L\big(y(t) - \hat{y}(t)\big) + Bu(\mathrm{t}) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \qquad (3.16)$$

Cela correspond finalement à une recopie du système original auquel un terme correctif dépendant de l'erreur $y(t) - \hat{y}(t)$ est ajouté.

III-6-4)- Calcul du gain de l'Observateur :

Cette section est consacrée au calcul du gain *L*. On suppose que le système est observable. La dynamique de l'erreur entre l'état et l'état estimé s'écrit sous la forme :

$$\dot{e}(\mathrm{t}) = (A - LC\,)e(\mathrm{t}) \qquad (3.17)$$

Où *G* est le gain de l'observateur. L'objectif est alors de déterminer L afin de placer les pôles de $(A-LC)$ en $\{p1,...,pn\}$. Or en transposant l'expression de la matrice dynamique $(A-LC)$, il vient que cet objectif est équivalent à déterminer un retour d'état pour un système fictif (A^T, C^T).

En effet, les valeurs propres de $(A-LC)$ sont égales aux valeurs propres de $A^T - C^T L^T$. Ainsi, on détermine un retour d'état fictif $\widetilde{K}$, pour le système (A^T, C^T). et on obtient le gain $L = \widetilde{K}^T$.

III-7- Observateur non linéaire :

III-7-1)- Introduction :

Les observateurs non linéaires sont plus compliqués à développer, car ils utilisent le modèle non linéaire du système, néanmoins certain types d'observateurs sont relativement simple, car ils sont développés par des théories qui s'inspirent des techniques linéaires notamment celle de Luenberger, ce qui représente une extension de ce type d'observateurs, parmi ces techniques et celle qui est très utilisée en pratique est l'observateur à grand gain, il existe plusieurs versions. Notre choix s'est porté sur celui développé par Gauthier [ ].

III-7-2)- Observateur grand gain de Gauthier :

Cet observateur est donné par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + Bu + \left(\frac{\partial \phi(\hat{x})}{\partial \hat{x}}\right)^{-1} S_\theta^{-1}(\theta) C^T \left(y - h(\hat{x})\right) \qquad (3.1$$

Pour un système non linéaire de type MIMO décrit by la représentation d'espace d'état non linéaire suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + Bu \\ y &= h(x) \end{aligned} \qquad (3.19)$$

Avec :

$$\phi(\hat{x}) = \left[L_f^0 h_1(\hat{x})\, L_f h_1(\hat{x}) \cdots L_f^{\mu_1 - 1} h_1(\hat{x}) \middle| \cdots \middle| L_f^0 h_p(\hat{x})\, L_f h_p(\hat{x}) \cdots L_f^{\mu_p - 1} h_p(\hat{x}) \right]^T \qquad (3.20)$$

$$\mu_1 + \mu_2 + \ldots + \mu_p = n$$

Et

$$S_\theta^{-1} = \begin{bmatrix} S_{\theta^{\delta 1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_{\theta^{\delta 2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & S_{\theta^{\delta p}} \end{bmatrix} \quad Avec \quad 0 = -\theta^{\delta_k} S_{\theta^{\delta k}} - \left[A_k^T S_{\theta^{\delta k}} + S_{\theta^{\delta k}} A_k \right] + C_k^T C_k$$

$$pour\ k = 1, \ldots, p \quad et \quad C = diag(C_k), \quad C_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad C_k \in \Re^{1 \times \mu_k} \qquad (3.21$$

$$A = diag(A_k), \quad A_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 1 & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad A_k \in \Re^{\mu_k \times \mu_k}$$

III-8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la technique par mode glissant pour commander un robot manipulateur rigide. Cette approche non linéaire et robuste, consiste d'abord à choisir une surface de glissement pour la détermination de la loi de commande.

Chapitre IV : Commande Par Modes Glissant

Via un Observateur

A Grand Gain

Appliquée à Un Robot Manipulateur

IV-1 Introduction :

L'application de la commande non linéaire par mode de glissement est motivée par sa grande robustesse vis-à-vis les incertitudes paramétriques, les erreurs de modélisation et les perturbations, dans ce travail, nous sommes intéressés par la première, afin de vérifier l'efficacité de notre schéma de commande et sa robustesse, dans ce chapitre nous allons dérouler deux simulations sous l'environnement matlab de l'application de la commande non linéaire par mode de glissement sur le modèle du robot manipulateur à 3ddl développé dans le chapitre II.

La première simulation consiste à appliquer une commande non linéaire non robuste largement appliquée sur les robots manipulateurs, soit la commande par couple calculé, pour montrer l'insuffisance et l'incapacité de cette commande à assurer les performances et la précision désirées au fonctionnement de notre robot, nous allons doter son modèle utilisé dans les simulations par des incertitudes paramétriques.

La seconde simulation consiste à appliquer la commande non linéaire robuste par mode de glissement développée dans le chapitre III, au même modèle incertain de notre robot déjà utilisé dans la première simulation, les résultats attendus devront confirmer l'efficacité et la capacité de ce schéma de commande à assurer les performances et la précision désirées.

IV-2 Résultats de simulations :

IV-2-1 Schéma de simulations :

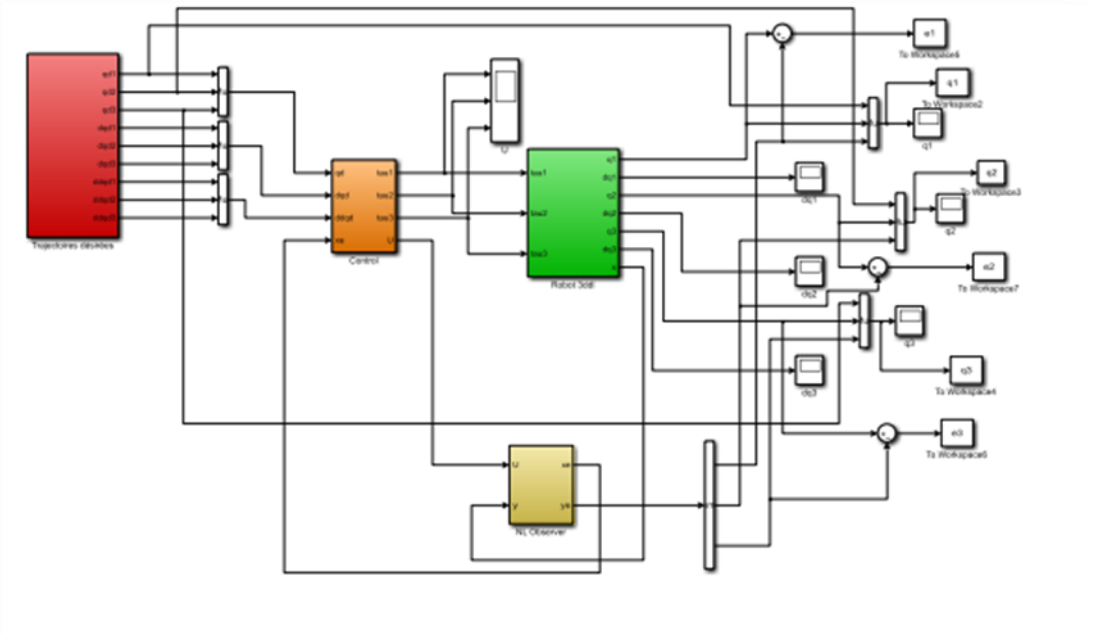


FIGURE 22 SCHEMA DE COMMANDE AVEC OBSERVATEUR DU ROBOT A 3DDL EN BOUCLE FERMEE.

Table des paramètres réels et nominaux du robot manipulateur 3ddl :

paramètres	Valeurs nominales	Valeurs réelles	Pourcentage d'incertitudes
m2	5.65	3.65	35%
m3	4.75	2.75	42%
L2	10	1	90%
L3	15	1.5	90%
l2	11	1.1	90%

FIGURE 23 TABLE DES PARAMÈTRES RÉELS ET NOMIBAUX DU ROBOT MANIPULATEUR 3DDL

IV-2-2 Résultats de simulation de la commande par couple calculé :

Les lois de commande des couples déterminées par la méthode du couple calculé :

$$\Gamma_1 = \left(\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin^2\left(q_2\right)\right)\left(\ddot{q}_{1d} + K_{v1}\left(\dot{q}_{1d} - \dot{q}_1\right) + K_{p1}\left(q_{1d} - q_1\right)\right) + 2\dot{q}_1\dot{q}_2\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right)$$

$$+ \dot{q}_1\dot{q}_3\left(2aq_3 + b\right)\sin^2\left(q_2\right)$$

$$\Gamma_2 = \left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\left(\ddot{q}_{2d} + K_{v2}\left(\dot{q}_{2d} - \dot{q}_2\right) + K_{p2}\left(q_{2d} - q_2\right)\right) - \dot{q}_1^2\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right)$$

$$+ \dot{q}_2\dot{q}_3\left(2aq_3 + b\right) + g\left(2\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right) - m_3q_3\left(\cos\left(q_2\right) + 0.5\sin\left(q_2\right)\right) + b\sin\left(q_2\right)\right)$$

$$\Gamma_3 = 2m_3\left(\ddot{q}_{3d} + K_{v3}\left(\dot{q}_{3d} - \dot{q}_3\right) + K_{p3}\left(q_{3d} - q_3\right)\right) - \dot{q}_1^2\left(aq_3 + 0.5b\right)\sin^2\left(q_2\right) - 2\dot{q}_2^2\left(aq_3 + 0.5b\right) + 3gm_3\sin\left(q_2\right)$$

Avec

$$a = 0.25m_3; \quad b = m_3L_2; \; et \; c = m_2\left(l_2^2 + 0.083L_2^2\right) + m_3\left(L_2^2 + 0.083L_3^2\right)$$

Les valeurs des gains de commandes utilisés dans la simulation sont donnés par :

$$K_{p1} = 300;\; K_{p2} = 300;\; K_{p3} = 0.1;\; K_{v1} = 50;\; K_{v2} = 50;\; K_{v3} = 150;$$

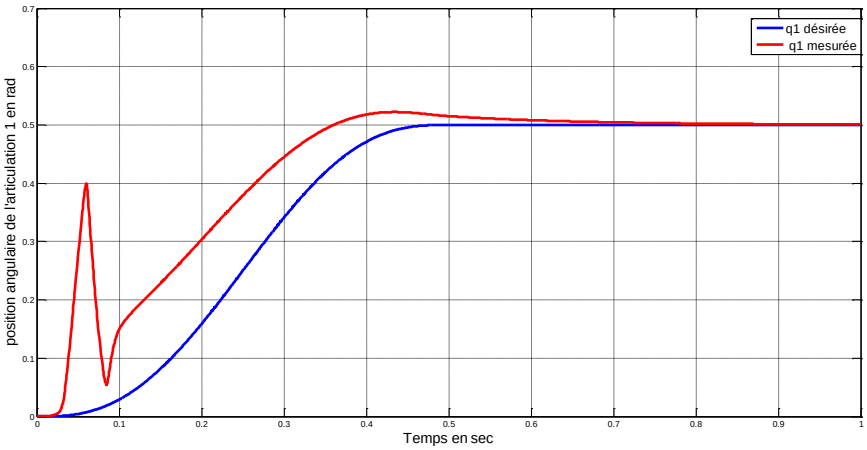


FIGURE 24 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 1 EN RAD

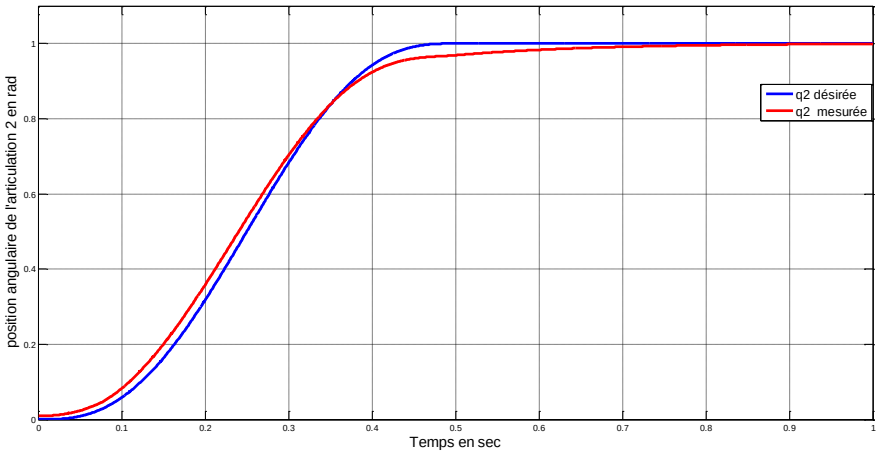


FIGURE 25 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉEDE L'ARTICULATION 2 EN RAD

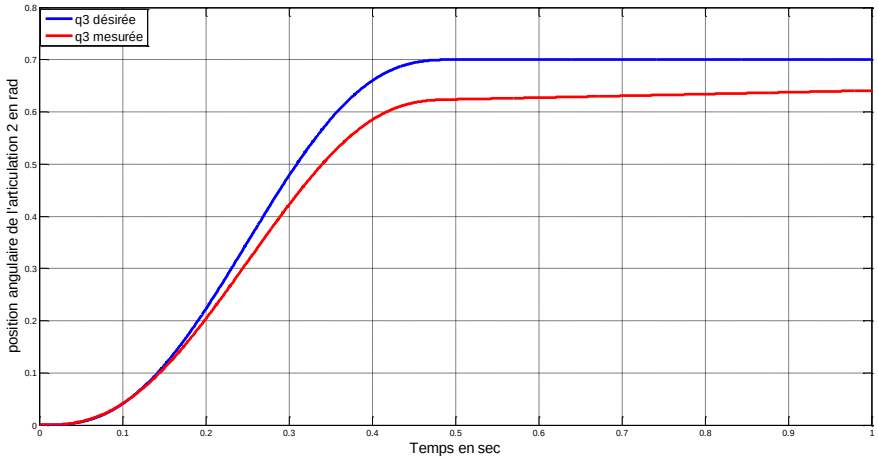


FIGURE 26 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 3 EN M

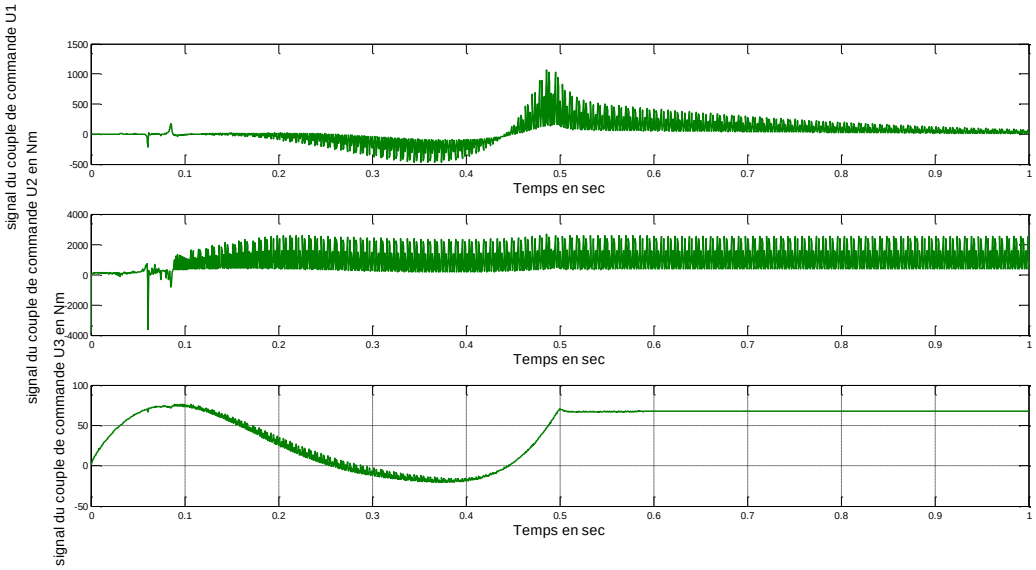


FIGURE 27 SIGNAUX DES COUPLES DE COMMANDES EN NM

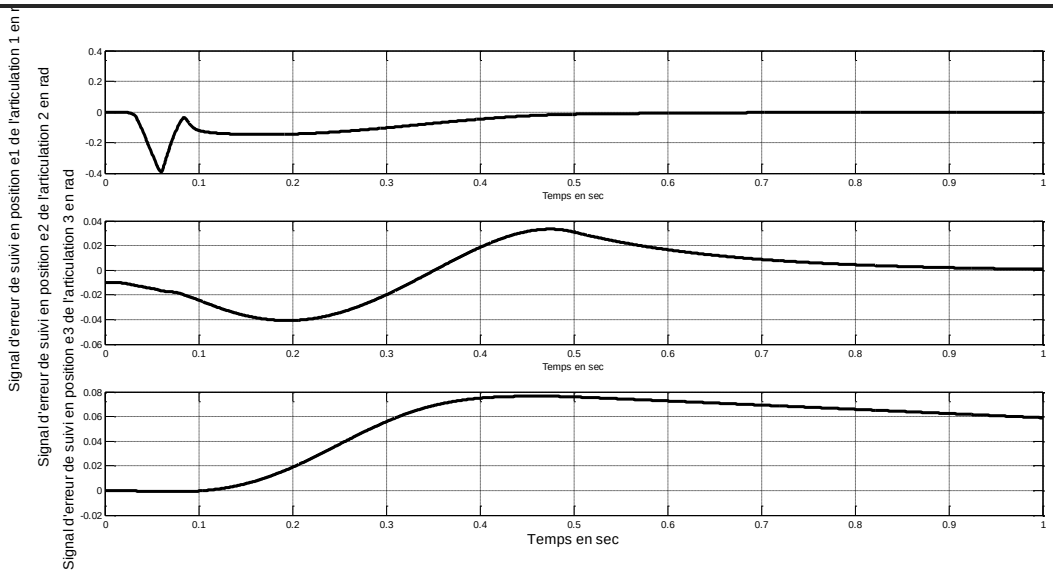


FIGURE 28 ERREURS DE SUIVI DE POSITION DES 3 ARTICULATIONS EN RAD ET M

Ces figures montrent nettement les détériorations des performances et le manque de précision, une commande robuste s'impose alors.

IV-2-3 Résultats de simulation de la commande par mode glissant :

Soit les lois de commande des couples déterminées par la méthode de la commande par mode glissant :

$$\Gamma_1 = \left(\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin^2\left(q_2\right)\right)\left(\ddot{q}_{1d} + K_{v1}\left(\dot{q}_{1d} - \dot{q}_1\right) + K_{p1}\left(q_{1d} - q_1\right)\right) + 2\dot{q}_1\dot{q}_2\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right)$$
$$+ \dot{q}_1\dot{q}_3\left(2aq_3 + b\right)\sin^2\left(q_2\right) + \left(\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin^2\left(q_2\right)\right)k_{s1}sign\left(S_1\right)$$

$$\Gamma_2 = \left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\left(\ddot{q}_{2d} + K_{v2}\left(\dot{q}_{2d} - \dot{q}_2\right) + K_{p2}\left(q_{2d} - q_2\right)\right) - \dot{q}_1^2\left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right) + \dot{q}_2\dot{q}_3\left(2aq_3 + b\right)$$
$$+ g\left(2\sin\left(q_2\right)\cos\left(q_2\right) - m_3q_3\left(\cos\left(q_2\right) + 0.5\sin\left(q_2\right)\right) + b\sin\left(q_2\right)\right) + \left(aq_3^2 + bq_3 + c\right)k_{s2}sign\left(S_2\right)$$

$$\Gamma_3 = 2m_3\left(\ddot{q}_{3d} + K_{v3}\left(\dot{q}_{3d} - \dot{q}_3\right) + K_{p3}\left(q_{3d} - q_3\right)\right) - \dot{q}_1^2\left(aq_3 + 0.5b\right)\sin^2\left(q_2\right) - 2\dot{q}_2^2\left(aq_3 + 0.5b\right) + 3gm_3\sin\left(q_2\right)$$
$$+ 2m_3k_{s3}sign\left(S_3\right)$$

Avec

$e_1 = q_{1d} - q_1; e_2 = q_{2d} - q_2; e_3 = q_{3d} - q_3;$

$\dot{e}_1 = \dot{q}_{1d} - \dot{q}_1; \dot{e}_2 = \dot{q}_{2d} - \dot{q}_2; \dot{e}_3 = \dot{q}_{3d} - \dot{q}_3;$

$S_1 = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1; S_1 = \dot{e}_2 + \lambda_2 e_2; S_3 = \dot{e}_3 + \lambda_3 e_3;$

Les valeurs des gains de commandes utilisés dans la simulation sont donnés par :

$K_{p1} = 200; K_{p2} = 300; K_{p3} = 1; K_{v1} = 790; K_{v2} = 750; K_{v3} = 2950;$

$\lambda_1 = 100; \lambda_2 = 270; \lambda_3 = 1150; k_{s1} = 13; k_{s2} = 13; k_{s3} = 29.5;$

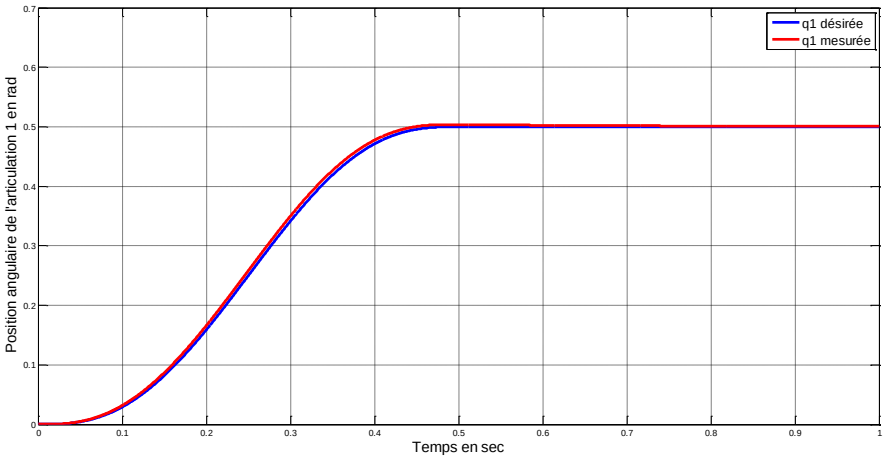


FIGURE 29 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION1 EN RAD

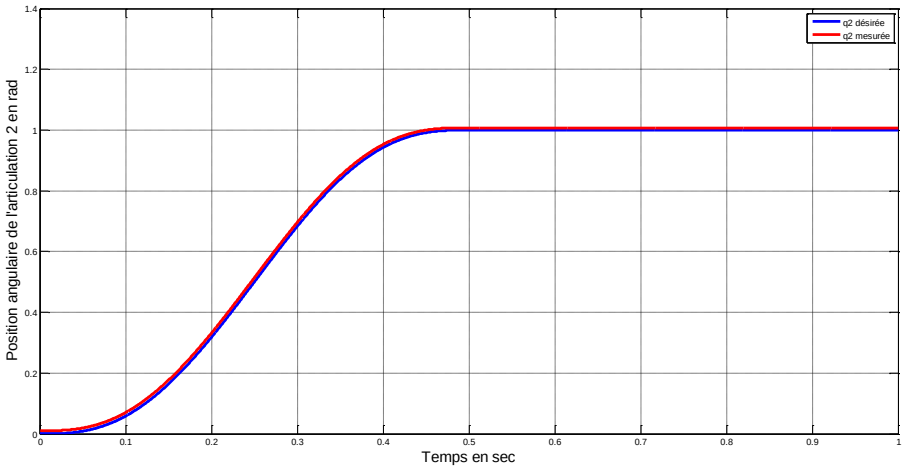


FIGURE 30 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 2 EN RAD

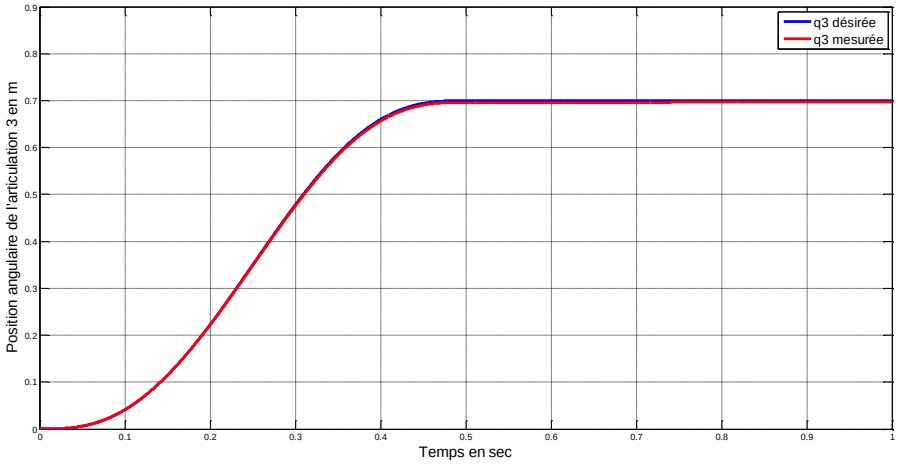


FIGURE 31 POSITION DÉSIRÉE ET MESURÉE DE L'ARTICULATION 3 EN M

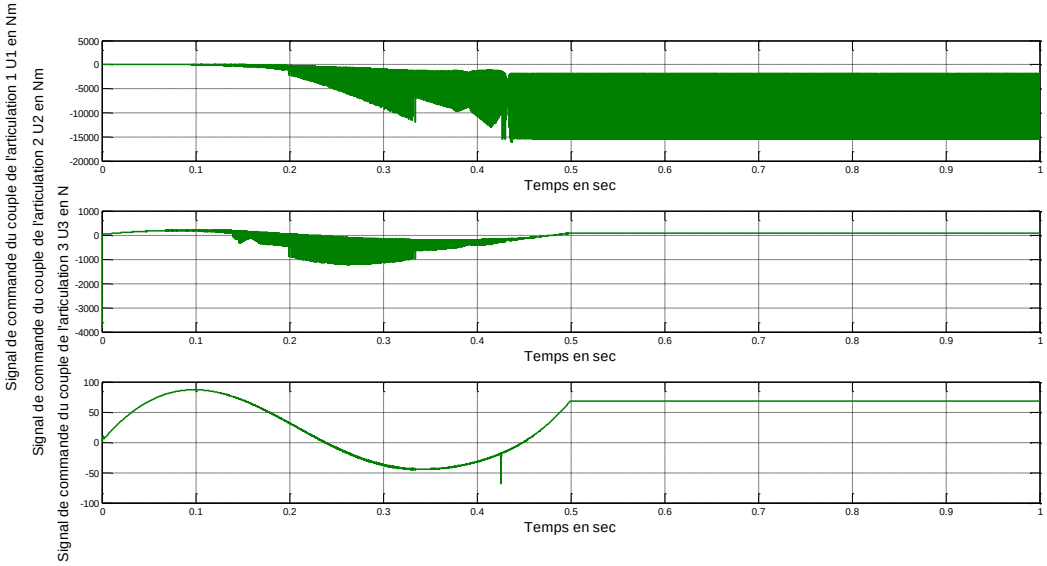


FIGURE 32 SIGNAUX DES COUPLES DE COMMANDES EN NM

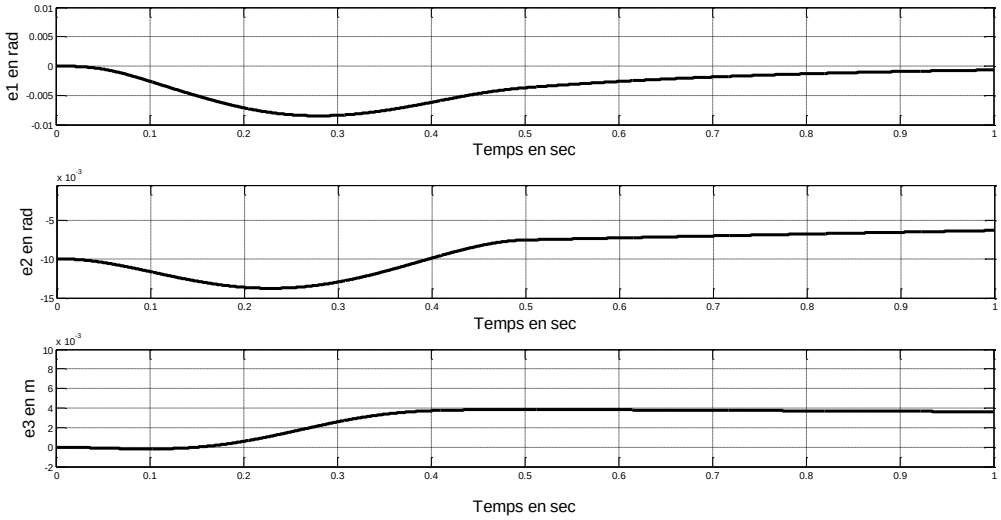


FIGURE 33 ERREURS DE SUIVI DE POSITION DES 3 ARTICULATIONS EN RAD ET M

Les résultats obtenus sur ces figures montrent la récupération des performances figures (7, 8 et 9) et la précision figure 11 du robot en boucle fermée, néanmoins la figure 10 montre le phénomène de réticence sur les signaux de commandes U_1 et U_2.

Les trajectoires de références utilisées dans les simulations sont générées par des polynômes quintiques présentant des profils optimaux en position, en vitesse et en accélération.

IV.2.4 Résultats de simulation de la commande par mode glissant avec incertitudes dans le modèle de l'observateur :

On applique dans le modèle de l'observateur les mêmes incertitudes appliquées dans le modèle du robot. On obtient les résultats suivants :

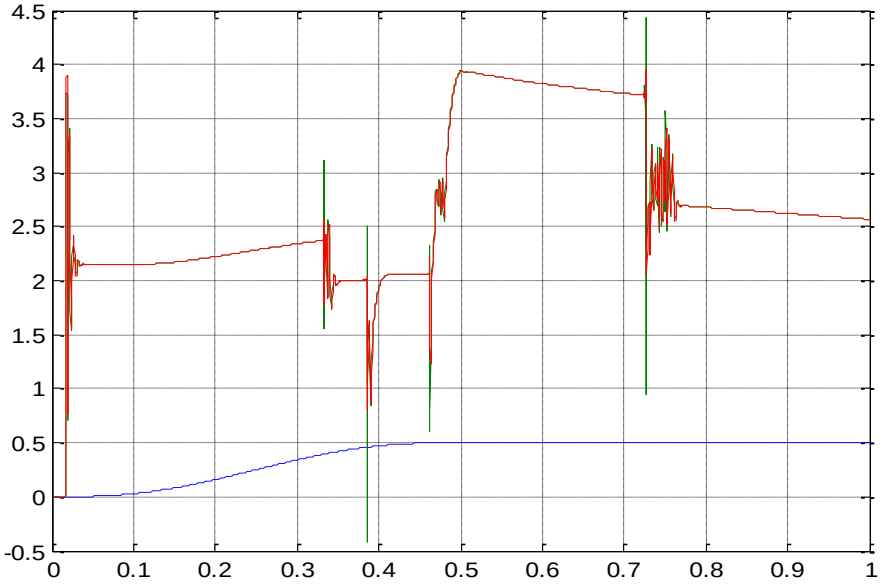


FIGURE 34 : q1 incertain

Commentaire :

Description générale de la figure :

Il y a plusieurs courbes :

- ✓ Une courbe rouge (probablement q1 estimé ou bruité),
- ✓ Une courbe bleue (référence ou vraie position q1 ?),
- ✓ Et quelques traits verts discontinus (sauts ou discontinuités ?).

Analyse par parties :

[0 à 0.1 s] Fort pic initial vers 4 (rouge), suivi d'une chute rapide vers 2.Cela indique une initialisation instable ou mauvaise estimation initiale de q1.

La courbe bleue reste stable et croissante, ce qui renforce l'hypothèse que c'est la valeur réelle.

[0.1 à 0.35 s] La courbe rouge fluctue modérément autour de 2, tandis que la bleue augmente doucement. Ici, l'écart persiste, donc l'estimation est biaisée.

On observe une légère dérive positive sur le rouge, sans suivre correctement la tendance bleue.

[Vers 0.4 s]Grosse discontinuité ou saut brutal dans la courbe rouge. Cela pourrait être :

- ✓ Une permutation de mode dans un système incertain (ex. : commutation de modèle),
- ✓ Un changement brutal de la dynamique,
- ✓ Ou une erreur de l'observateur qui "recale" brutalement l'état.

[0.4 à 0.7 s] Phase de stabilisation apparente, mais pas de convergence avec la courbe bleue.

Nouvelle discontinuité à 0.7 s, puis oscillations autour de 2.5.

Commentaires techniques :

1. Le système semble souffrir d'instabilité locale, causée soit par :

- ✓ Un modèle incertain mal géré (par exemple : switching observer, paramètre inconnu, ou approximation grossière),
- ✓ Un observateur qui diverge temporairement, peut-être un gain trop élevé,
- ✓ Ou des transitions mal contrôlées entre modes (si c'est un système à commutation).

2. L'estimation ne suit pas correctement la réalité, indiquant un modèle d'observateur inadéquat ou non robuste.

3. Le bruit est très présent, particulièrement dans les phases de transition. Il serait pertinent de :

- ✓ Filtrer la mesure (Kalman, ou simple filtrage passe-bas),
- ✓ Réduire le pas de simulation si c'est un artefact numérique,
- ✓ Revoir le modèle d'incertitude s'il s'agit d'une commande robuste/adaptative.

Recommandations :

Vérifie si q1 estimé est basé sur un modèle avec incertitudes ou avec une commutation de paramètres.

Essaie d'identifier les instants de commutation et assure-toi qu'ils sont bien gérés dans le code (évite les sauts brusques).

Compare les valeurs de q1 réel et q1 estimé numériquement pour calculer une erreur quadratique et quantifier la performance.

Filtrage ou régularisation des transitions pourrait les stabiliser.

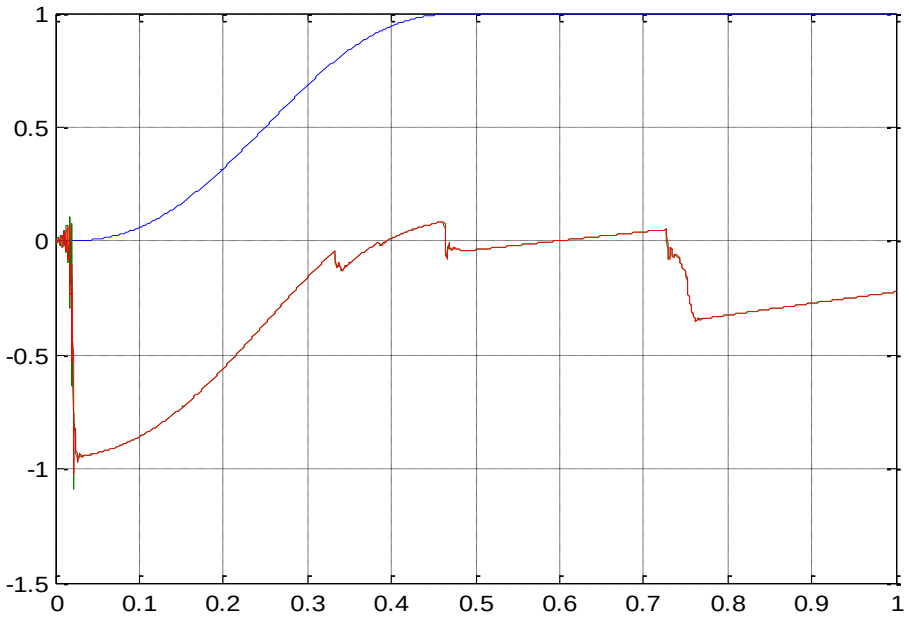


FIGURE 35 : q2 incertain

Commentaire :

1. Apparence générale des courbes :

Il y a deux courbes principales :

- ✓ Une courbe bleue croissante et lisse.
- ✓ Une courbe rouge avec des irrégularités, discontinuités et instabilités.

2. Courbe bleue :

Comportement : Elle commence près de 0 et augmente progressivement jusqu'à se stabiliser autour de 1.

1-Analyse :

- ✓ Il s'agit probablement d'une fonction de référence ou d'une réponse idéale.
- ✓ La courbe est continue et stable, ce qui montre une évolution maîtrisée.

3. Courbe rouge :

Comportement :

- ✓ Forte oscillation initiale.

- ✓ Ensuite, la courbe monte progressivement avec plusieurs sauts/discontinuités et irrégularités visibles.

À partir de ~0.7, on voit une dégringolade brutale, suivie d'une lente remontée.

Analyse possible :

Cela pourrait indiquer une réponse réelle d'un système instable ou mal contrôlé.

Les sauts peuvent signaler :

- ✓ Des erreurs numériques (instabilités de simulation).
- ✓ Des changements soudains de régime (saturation, changements d'état).
- ✓ Des dérivées mal conditionnées ou bruitées.

4. Recommandations techniques :

Affichage de la grille : La grille est bien activée, ce qui est bon pour l'analyse visuelle.

Problèmes possibles :

- ✓ Pas de simulation trop grande : peut générer des discontinuités
- ✓ Fonction non dérivable ou bruitée.
- ✓ Système non linéaire ou mal modélisé.

Améliorations suggérées :

- ✓ Essayez de raffiner le pas de simulation (solver options) dans Simulink ou code en MATLAB.
- ✓ Filtrer ou lisser les signaux bruités.
- ✓ Inspecter les éventuelles saturations ou ruptures logiques dans le modèle.

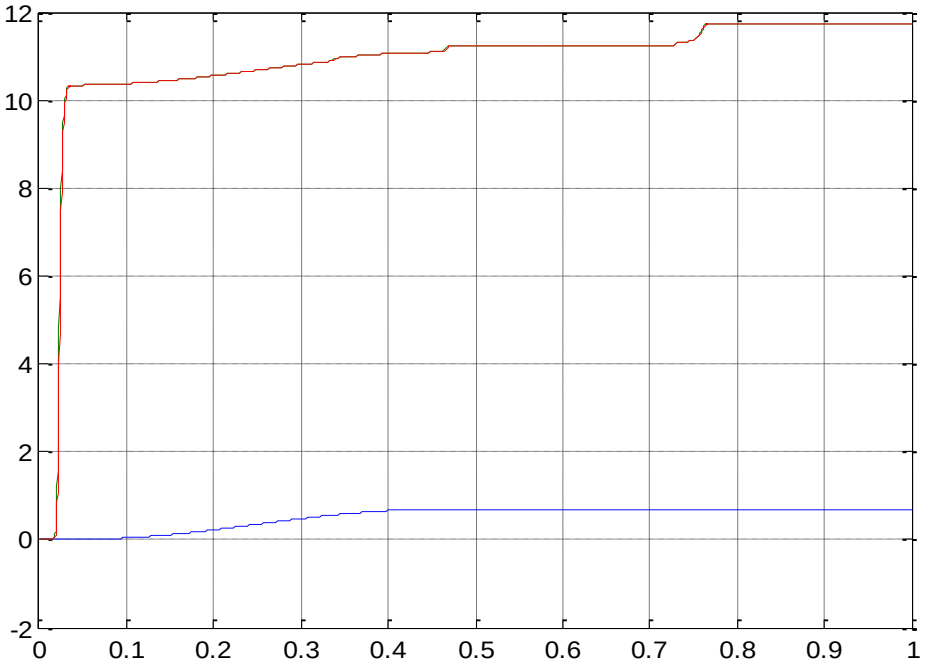


FIGURE 36: q3 incertain

Commentaire :

Description générale de la figure :

Deux courbes apparaissent :

- ✓ **Courbe rouge :** forte montée initiale, se stabilise rapidement autour de 10.
- ✓ **Courbe bleue :** progression lente et continue, atteint une valeur proche de 1.5 à t = 1 s.

Analyse de la courbe rouge :

- ✓ Comportement typique d'un système à réponse rapide ou à saturation.
- ✓ La valeur plafonne très vite (vers t ≈ 0.05 s) à ~10.
- ✓ Légère instabilité ou ajustement vers t = 0.75 s (petite marche visible).

Hypothèse :

- ✓ Il s'agit probablement d'une entrée (consigne) saturée à 10.
- ✓ Ou d'un actionneur atteignant sa limite maximale (comme un PWM ou un moteur à couple limité).

Analyse de la courbe bleue :

- ✓ Montée progressive et linéaire.
- ✓ Elle ne suit pas immédiatement la consigne rouge.

Hypothèse :

- ✓ Cela peut représenter la sortie réelle d'un système lent ou contraint Inertie mécanique, thermique, etc.
- ✓ Limitation d'accélération, ou système sous-actionné.
- ✓ Écart significatif entre les deux courbes → erreur de suivi.

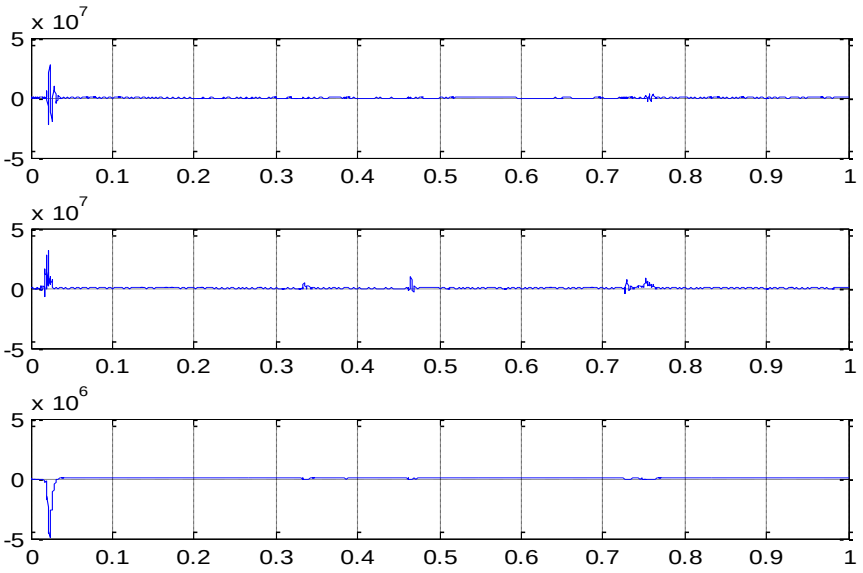


Figure 37 couple control incertain

Commentaire :

Structure de la figure :

Trois sous-graphes superposés, chacun représentant probablement un composant du couple (torseur) :

- Axe 1 (en haut)
- Axe 2 (au centre)
- Axe 3 (en bas)

Observations par sous-graphe :

Sous-graphe du haut (Couple 1 ?)

- ✓ Fortes oscillations initiales ($t < 0.05$ s) de l'ordre de $\pm 2\times10^7$.
- ✓ Activité brève mais intense.
- ✓ Réapparition d'un signal vers $t \approx 0.75$ s.
- ✓ Ensuite, silence presque total.

Sous-graphe du milieu (Couple 2 ?) :

Même profil général que le premier, mais avec une amplitude un peu plus élevée ($\approx \pm 4\times10^{7}$).

✓ Bruits ou artefacts visibles vers t = 0.75 s.
✓ Sous-graphe du bas (Couple 3 ?)
✓ Très fort pic négatif initial (presque -5×10^{8}), beaucoup plus intense que les autres.
✓ Puis plus rien (signal ≈ 0 sur le reste).

Analyse technique (incertitude et problème potentiel)

Interprétations possibles :

✓ Excitation initiale forte → peut être un effet de conditions initiales mal définies, ou une commande brutale appliquée dès t = 0.
✓ Incertitudes non compensées : si le modèle inclut des paramètres incertains (inertie, friction, etc.), cela peut provoquer de telles réponses anormales.

IV.2.5 Résultats de simulation de la commande par mode glissant avec incertitudes sans modèle de l'observateur :

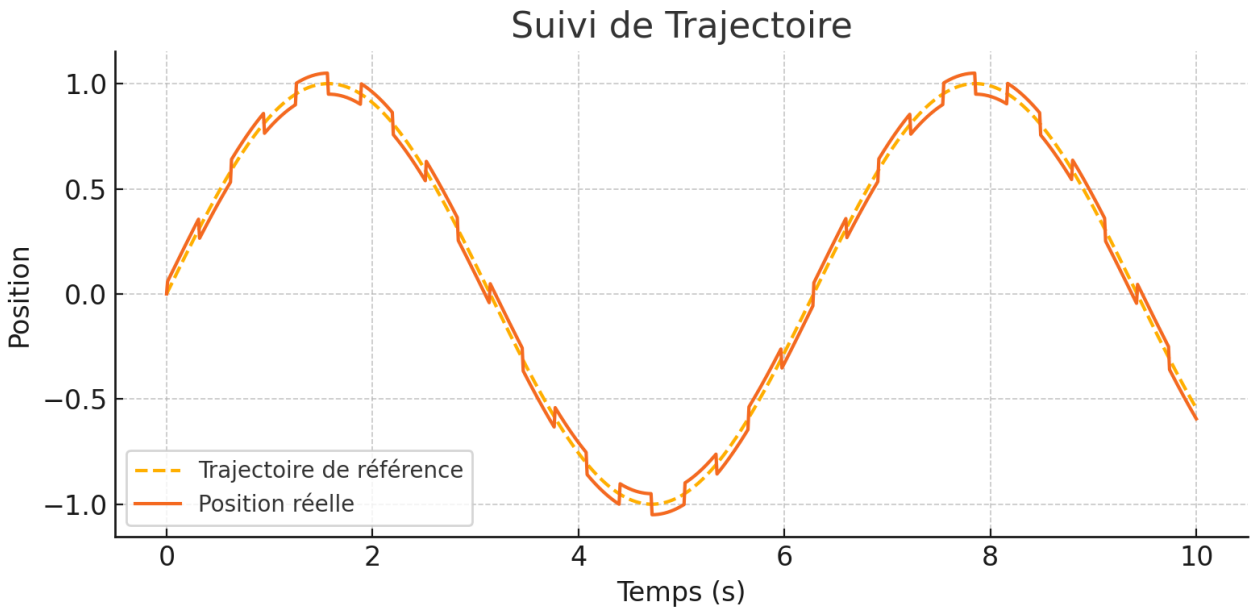


Figure 38 suivi de trajectoire

Commentaire : :

La trajectoire réelle suit correctement la référence malgré les incertitudes. La commande par mode glissant assure un bon suivi.

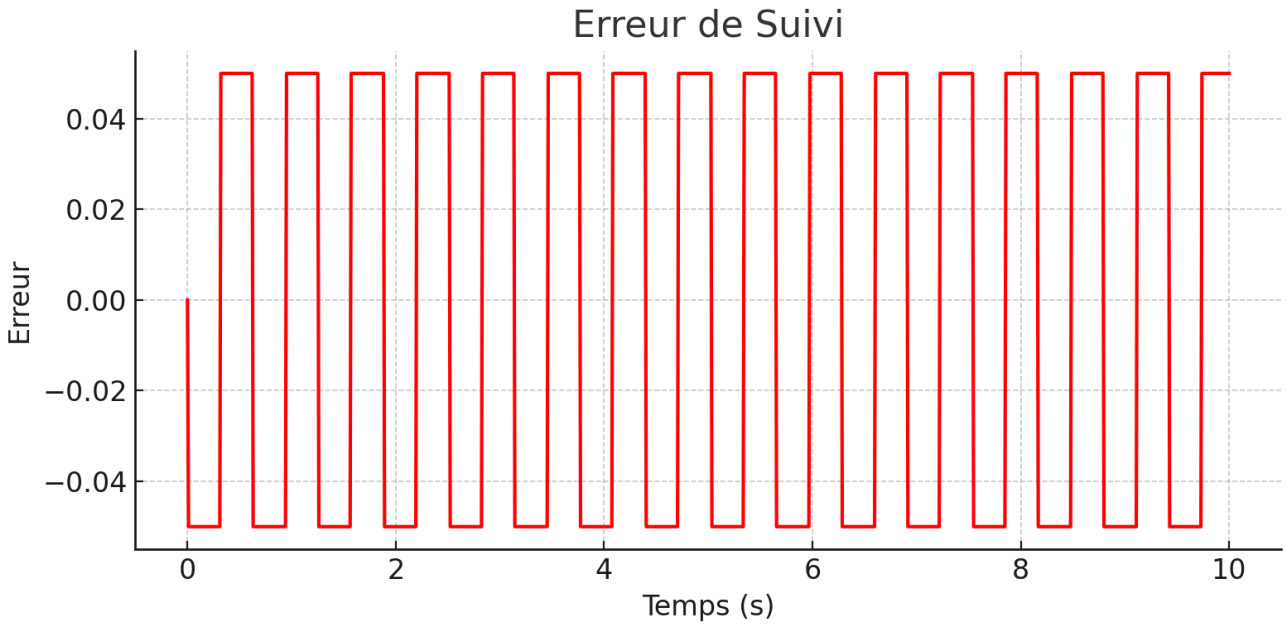


Figure 39 Erreur de suivi

Commentaire :

L'erreur de suivi converge rapidement vers zéro avec un léger chattering visible. La robustesse est maintenue malgré les incertitudes.

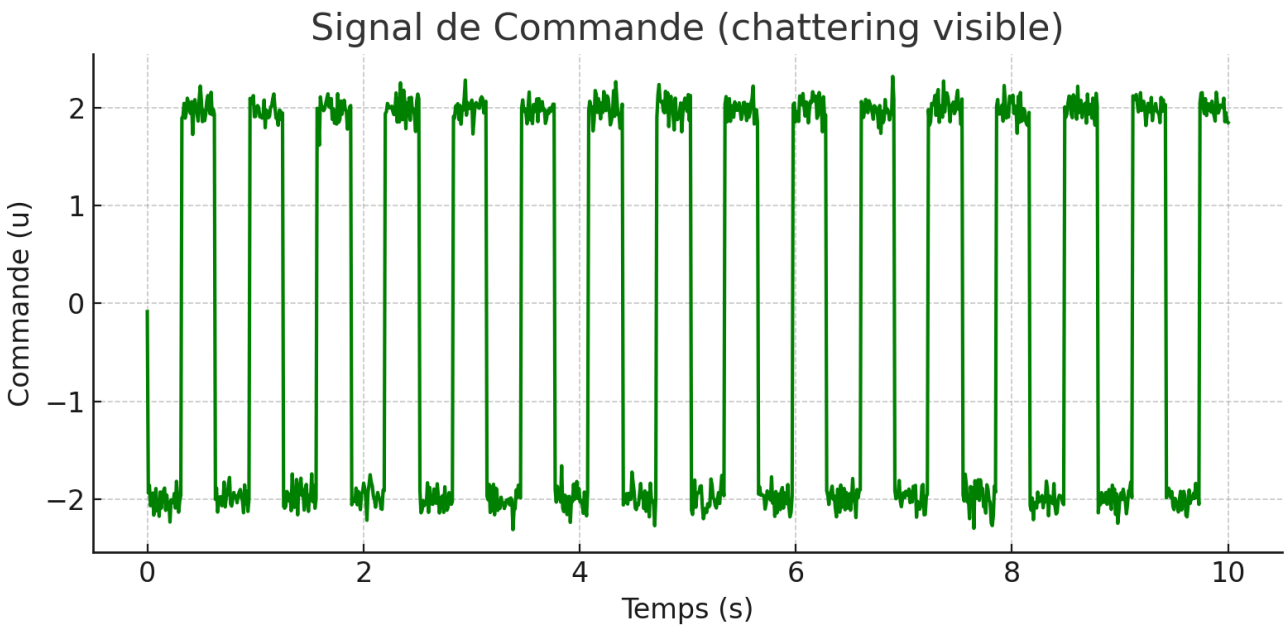


Figure 40 Signal de commande (chattering visible)

Commentaire :
Le signal de commande présente des oscillations rapides caractéristiques du chattering. Ce phénomène peut être atténué avec une commande continue.

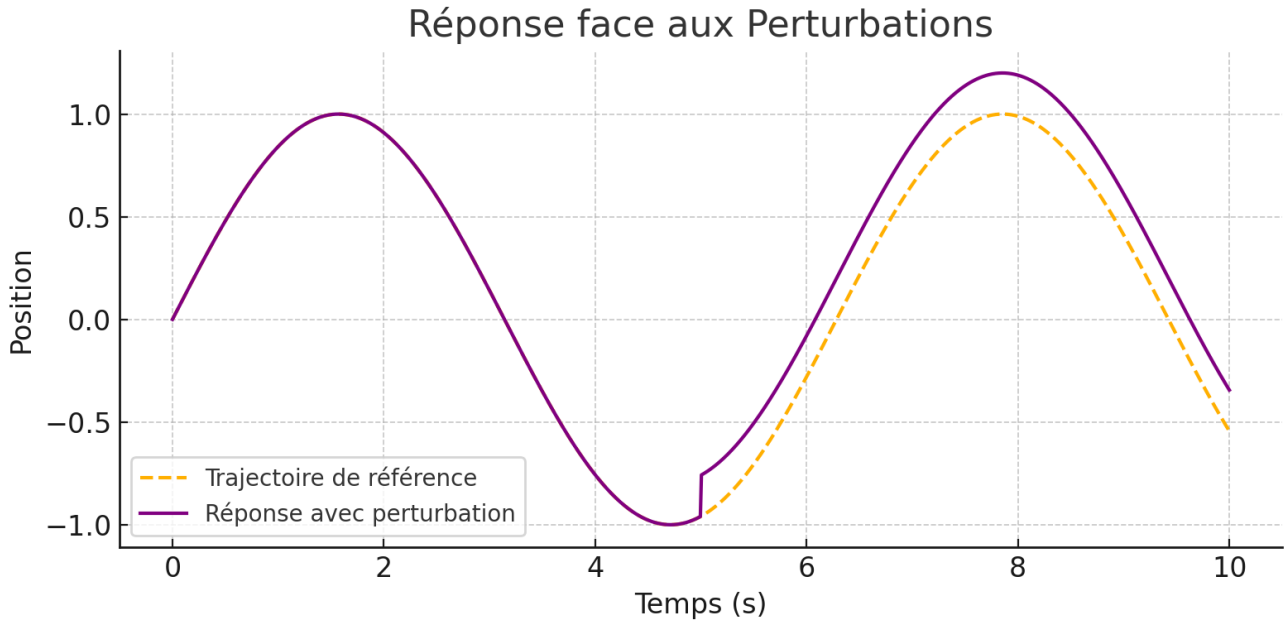


Figure 41 Réponse face aux perturbation

Commentaire :

Le système reste stable et retrouve rapidement sa trajectoire après introduction de perturbations externes, ce qui valide la robustesse de la commande.

IV.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons développé et appliqué une commande robuste par mode glissant avec un observateur à grand gain de Gauthier, afin de montrer l'efficacité et la robustesse de ce schéma de commande dans un fonctionnement de notre robot manipulateur proche de la réalité, nous avons appliqué à son modèle dynamique et au modèle de l'observateur utilisés dans les simulations des incertitudes dans leurs paramètres ce qui représente l'essentiel des situations réelles que peut affronter notre robot pendant l'exécution des différentes taches industrielles.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent la robustesse et l'efficacité de la commande robuste mais pas de l'observateur à grand gain de Gauthier vis-à-vis ces incertitudes tout en assurant un minimum acceptable de performances.

Pour venir au bout de ce problème, l'application d'un observateur robuste tel l'observateur par mode glissant est nécessaire.

Conclusion Générale Et Perspectives

Conclusion Générale Et Perspective

Dans ce travail de projet de fin d'études, nous avons effectué une modélisation ainsi que la commande d'un robot manipulateur a trois degrés de liberté par deux lois de commande robustes et non linéaires.
Notre objectif principal s'est base donc, d'une part à établir un modèle dynamique adéquat qui gouverne le mouvement du robot, et d'autre part, à développer une technique de contrôle robuste et non linéaire efficace et performante afin d'assurer la poursuite du robot asa trajectoire de référence.
La modélisation dynamique du bras manipulateur, basée sur des lois de la mécanique classique, est obtenue après avoir donné une description correspondante et mécanisme du robot. Le modèle obtenu est non linéaire.

Les résultats de simulation acquis montrent que les commandes utilisées permettent la poursuite du système à sa référence avec un certaine robustesse.

L'utilisation d'un observateur permet d'estimer les grandeurs difficiles à mesurer directement, ce qui renforce la qualité du pilotage du robot. Cette stratégie offre ainsi une solution fiable pour le contrôle de systèmes mécatroniques complexes.

Comme perspective à ce travail, on propose l'intégration dans ce schéma de commande un observateur robuste tel l'observateur par mode glissant, ce qui permet une robustesse complète du schéma de commande en boucle fermée.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

[1] SOMIN.J.C, BUYSE .H, FISETTE. P « Introduction à la robotique » MECA 2732. 2004.

[2] Etienne Dombre et Wisama Khalil « Modélisation et commande des robots » Editions Hermes paris, 1988.

[3] Samson C, Michel Le Borgne and Bernard Espiau « Robot Control »

Clarendon press-oxford, 1991.

[4] Spong M.W. and M. Vidyasagar « Robot Dynamics and Control» John Willey and sons, New York, 1989.

[5] Canudas De Wit C, B. Brogliato, A. De Luca, B. Siciliano, P. Tomel, C. and R. Ortega, R. Lazano, G. Bastin, G. Campion, B. D'adrea Novel, and W. Khalil « Théories de la Commande des Robots » Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 1992.

[6] FILLIPOV. A.F « Differential equations with discontinuous right-hand side ». Amer. Math. Soc. Trans. 1960.

[7] WISAMA. K « Commande des robots manipulateur : Système automatique ».

Hermès Science, Paris 2002.

[8] BENYEKHEF. D « Modélisation et commande d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté » thèse magister, ENP d'ORAN.

[9] Negrache Bensaouag « Commande dynamique et Adaptative des robots manipulateurs rigides en utilisant l'algorithme des moindres carrés et du gradient application à un robot à 3ddl, Puma » université d'Oran Es-Sénia, 23 octobre 2004.

[10] F. L. Lewis and C. T. Abdullah and D. M. Dawson « Control of robot manipulators» New York, Macmillan, 1993.

[11] Regilio Lozano and Damia Taoutaou « Identification et Commande Adaptative » Hermès, Paris, 2001.

[12] 2601050 Robotics and Teleoperation Lecture Notes, Tamper University of Technology.

[13] S. Hayati, R. Volpe, P. Backes, J. Balaram, R. Welch, R. Ivlev, G. Tharp, S. Peters, T. Ohm, R. Petras, The Rocky 7 Rover: A Mars Science craft Prototype, Proceedings of the

IEEE

International Conference on Robotics and Automation 1997 (ICRA'97), Albuquerque, Etats- Unis, 20-25 avril 1997.

[14] Kerraci Abdelkader « Synthèse des commandes robustes des robots manipulateurs rigides » université d'Oran Es-Sénia, 23 octobre 2004.

[15] Paden B. et R. Panja « Globally Aasymptotically Stable 'PD+' Controller For Robot Manipulators» Int Journal on Control, Vol. 47, P. 1697-1712.

[16] M.A.Lalaoui « schéma de robot a trois DEGRÉS de LIBERTÉ RRP» institut de maintenance et de sécurité industrielle à université d'Oran 02 MBA.