



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de Maintenance en Instrumentation

Thème

Commande robuste d'un robot manipulateur

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom BELGACEM **Prénom** Hichem

Nom ZIANI CHERIF **Prénom** FethiMahir

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme DJEBLI Yamina	MAA	IMSI-Univd'oran 2	Président
Mme BENMANSOUR Souhila	MCB	IMSI-Univd'oran 2	Encadreur
Mme RAHIEL Rachida	MCB	IMSI-Univd'oran 2	Examineur

Juin 2018

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur madame Benmansour Souhila qui a veillé à ce que ce travail soit réalisé, et c'est avec un énorme plaisir qu'on lui exprime notre profonde gratitude, on pense vraiment que c'est une personne avec une grande culture scientifique, et avec beaucoup de bonnes qualités humaines.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont répondu favorablement afin d'examiner notre travail.

Mes sincères gratitudees au Groupe kherbouche, société Canal Plast, à leur tête le patron Mr Kamal KHERBOUCHE, pour son soutien, sa compréhension, sa générosité et sa contribution à la réussite de ce projet. Nos amis qui nous ont soutenus de près ou de loin et plus spécialement Mr Maher TALEB et Mr Redouane BEDJAOUI qui nous ont épaulé jusqu'au dernier moment de la réalisation de ce travail.

À ma femme Ania: Aucun mot ne saurait t'exprimer ma profonde gratitude pour l'amour, la tendresse et la gentillesse dont tu m'as toujours entouré. Chère épouse j'aimerais bien que tu trouves dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères car grâce à ton aide et à ta patience avec moi que ce travail a pu voir le jour... Que dieu le tout puissant nous accorde un avenir meilleur.

Sommaire

Listes des illustrations	i
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la robotique	3
I.1. Introduction	4
I.2. Préliminaire sur la robotique	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Historique.....	6
I.2.3. Robots manipulateurs	10
I.2.3.1. Constituants mécaniques.....	12
I.2.3.2. Organe terminal	12
I.2.3.3. Structure mécanique articulée.....	12
I.2.3.4. Articulation	13
I.2.3.5. Espace de travail des robots manipulateurs	14
I.2.3.6. Redondance.....	15
I.2.3.7. Configurations singulières	15
I.2.3.8. Degré de liberté (ddl).....	15
I.2.3.9. Générations de robot.....	15
I.3. Les types de robot manipulateur	16
I.3.1. Robot cartésien	16
I.3.2. Robot cylindrique	16
I.3.3. Robot SCARA :	17
I.3.4. Robots parallèles.....	17
I.4. Conclusion.....	18
Chapitre II : Modélisation du robot manipulateur	19
II.1. Introduction	20

II.2. Présentation de robot manipulateur à 2DDL.....	20
II.3. Modélisation d'un bras manipulateur à 2 ddl.....	20
II.3.1. Modèle dynamique du robot.....	21
II.4. Conclusion :.....	26
Chapitre III : Commande d'un robot par Backstepping.....	27
III.1. Introduction	28
III.2. Conception de la loi de commande backstepping	28
III.3. Application de la commande backstepping au robot	31
III.3.1 Backstepping sans l'action intégrale	31
III.3.2. Backstepping avec l'action intégrale	34
III.4. Résultat des simulations	37
III.4.1. Sensibilité de la commande au bruit de mesure	43
III.4.2. Sensibiité de la commande au bruit de mesure et changement des paramètres du robot	42
III.5. Conclusion :.....	50
Conclusion générale.....	52
Bibliographie	56

Listes des illustrations

Listes des figures

Figure I-1 : Différentes catégories des robots	5
Figure I-2 : Exemples de domaine d'application des bras manipulateurs.....	11
Figure I-3 : Schéma d'un bras manipulateur.....	12
Figure I-4 : Chaînes cinématiques ouverte (a), arborescentes (b) et fermée (c).	13
Figure I-5 : Articulation rotoïde	14
Figure I-6 : Articulation prismatique	14
Figure I-7 : Espace de travail des robots manipulateurs	14
Figure I-8 : Robot Cartésien.....	16
Figure I-9 : Robot cylindrique.....	16
Figure I-10 : Robot SCARA.....	17
Figure I-11 : Robot parallèles.....	17
Figure II-1 : Robot à deux degrés de liberté.....	26
Figure III-1 : Schéma bloc de la commande backstepping avec deux perturbations	38
Figure III-2 : Poursuite de position 1.2 (Back + bruit de mesure)	39
Figure III-3 : Poursuite de vitesse 1.2 (Back + bruit de mesure)	39
Figure III-4 : Erreur de la position angulaire 1 (Back + bruit de mesure)	40
Figure III-5 : Erreur de la position angulaire 2 (Back + bruit de mesure)	40
Figure III-6 : Erreur de la vitesse angulaire 1 (Back + bruit de mesure)	41
Figure III-7 : Erreur de la vitesse angulaire 2 (Back + bruit de mesure)	41
Figure III-8 : Schéma bloc de la commande backstepping avec deux perturbations	42
Figure III-9 : Poursuite de position 1.2 (Back + bruit de mesure +test de robustesse)	43
Figure III-10 : Poursuite de vitesse 1.2 (Back + bruit de mesure +test de robustesse)	44
Figure III-11 : Erreur de la position angulaire 1(Back + bruit de mesure +test de robustesse)	44
Figure III-12 : Erreur de la position angulaire 2(Back + bruit de mesure +test de robustesse).....	45
Figure III-13 : Erreur de la vitesse angulaire 1(Back + bruit de mesure +test de robustesse)	45
Figure III-14 : Erreur de la vitesse angulaire 2 (Back + bruit de mesure +test de robustesse)	46
Figure III-15 : Poursuite de position 1.2 (Back intégrale + bruit de mesure + robustesse)	47
Figure III-16 : Poursuite de vitesse 1.2 (Back intégrale + bruit de mesure + robustesse)	47
Figure III-17 : Erreur de la position angulaire 1(Back intégrale+bruit de mesure+robustesse)	48
Figure III-18 : Erreur de la position angulaire 2(Back intégrale+bruit de mesure+robustesse)	49
Figure III-19 : Erreur de la vitesse angulaire 1(Back intégrale+bruit de mesure+robustesse)	49
Figure III-20 : Erreur de la vitesse angulaire 2(Back intégrale+bruit de mesure+robustesse)	50

Listes des Tableaux

Tableau III-1 : Paramètre du robot	37
Tableau III-2 : Les paramètre de la commande backstepping appliqués au robot en présence du bruit de mesure	38
Tableau III-3 : les paramètres de la commande backstepping avec trois perturbations.....	43
Tableau III-4 : Les paramètres de la commande backstepping avec deux perturbations.....	47

Introduction générale

Les systèmes réels sont pratiquement non linéaires, mal définis, ont des paramètres variables et sont soumis à des perturbations externes. La modélisation de ces systèmes relève très souvent d'une approximation des phénomènes physiques mis en jeu. Or, c'est à partir de cette représentation approximative des systèmes que l'on souhaite construire une commande pour le système réel. Cette commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations externes. L'objectif de ce travail consiste à synthétiser et développer des commandes robustes, non linéaires, performantes et relativement simples à mettre en œuvre.

Ces systèmes technologiques sont au cœur de nombreuses applications permettant d'aider l'humain dans des tâches dangereuses, trop complexes ou impossibles. Parmi ces applications, certaines peuvent blesser des humains.

L'utilisation des robots dans le domaine médical a commencé dans les années 80, par des laboratoires de recherche et des industriels qui ont développé des robots pour des applications médicales variées qui vend des robots pour des interventions chirurgicales aux robots de réhabilitation en passant par des simulateurs d'entraînement pour chirurgiens.

La télé-opération est un domaine pluridisciplinaire qui peut être de l'ordre technologique, technique ou scientifique. Grâce à l'expansion des réseaux de communication modernes tel qu'internet, cette thématique a reçu une grande attention ces dernières années avec des champs d'application de plus en plus vastes : opérations télé-opérées sur des sites lointains ou difficiles d'accès, tel que la télé-échographie. Au niveau de ce domaine, le laboratoire de Vision et Robotique, dispose d'un système de télé-échographie permettant d'effectuer par un médecin spécialiste une échographie à distance sur un patient à l'aide d'un robot manipulateur. Les actions de recherche s'intègrent dans ce domaine et concernent plus particulièrement l'utilisation et l'introduction de nouveaux outils de commande robuste des systèmes de télé-opération linéaires. Les recherches actuelles sont donc centrées sur l'utilisation et la modélisation du robot type SCARA pour faire une échographie sur un patient même s'il est loin du centre médical.

Lorsque la partie commandée du processus est faiblement perturbée et si les exigences en précision et en performance du système ne sont pas trop sévères, les commandes classiques, par exemple à action proportionnelle intégrale dérivée (PID), peuvent être suffisantes. Dans le cas contraire, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant la robustesse du comportement du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations, ainsi que sur les perturbations diverses qui engendrent le système à commander. On peut citer dans ce contexte, les commandes suivantes : H_∞ , placement de pôle robuste, modes glissants, backstepping.

Dans le cadre de ce présent travail, nous avons appliqué deux lois de commandes robustes et non linéaires sur un robot manipulateur à deux degrés de liberté. Les commandes appliquées pour ce prototype, à savoir le backstepping et le backstepping à action intégrale, sont des techniques qualifiées par leur robustesse en stabilité et en performance.

Ce mémoire est présenté en trois chapitres.

Chapitre I :

Présente les concepts de base nécessaires à la bonne compréhension du mémoire ou nous avons donné des généralités sur la robotique et un peu d'histoire.

Chapitre II:

Explique les étapes à suivre pour développer le modèle dynamique du robot manipulateur à deux degrés de liberté considéré dans ce travail.

Chapitre III :

Sera réservé à la commande robuste backstepping avec et sans l'action intégrale en donnant en premier lieu l'algorithme général de cette méthode. Les résultats de simulation de l'application du backstepping au robot sont ainsi présentés et interprétés.

Chapitre I

Généralités sur la robotique

I.1. Introduction

C'est au siècle dernier que la robotique industrielle a amorcé l'explosion des thèmes de recherche. A cette époque les robots étaient conçus en respectant les contraintes imposées par le milieu industriel, comme la répétitivité, la précision dans la réalisation des tâches, le respect des cadences de production,..., etc. Les premiers robots à avoir été conçus dans ce domaine sont les bras manipulateurs, dont leur utilisation s'est peu à peu banalisée.

Nous nous sommes intéressés, dans ce premier chapitre, à donner quelques notions sur la robotique.

I.2. Préliminaire sur la robotique

La robotique est la science qui s'intéresse aux robots. En fait, il s'agit d'un domaine multidisciplinaire: on y trouve des aspects concernant la mécanique, l'informatique, l'électronique, l'automatique, l'instrumentation, etc.

Le terme 'robot' est apparu pour la première fois vers 1920 dans une pièce de théâtre du tchèque Karel Capek où il désignait de petits êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maître ("robota" signifie travail en tchèque).

I.2.1 Définition

Généralement, nous pouvons définir un système robotique comme étant un système artificiel, équipé de capteurs et d'actionneurs, conçu pour agir sur le monde qui l'entoure. Il existe de nombreuses catégories de systèmes robotiques, à titre d'exemple: bras manipulateur, main articulée, véhicule terrestre ou aérien, robot humanoïde, ..., etc. Les robots actuels sont dotés d'une 'intelligence' qui leur permet d'accomplir des missions complexes de manière autonome. Nous donnons par la suite quelques exemples de robots.

Les robots sont principalement utilisés dans l'industrie pour effectuer des manipulations répétitives, surtout lorsque le processus de fabrication est fréquemment soumis à des modifications. Par exemple la soudure des composantes sur les circuits imprimés dans l'industrie électronique.

Pourquoi les robots ?

L'avantage d'un robot par rapport à l'homme est sa régularité c'est-à-dire le robot peut exécuter le même mouvement des milliers de fois d'affilée sans ressentir la moindre lassitude ou fatigue. De plus, les robots peuvent être construits de manière à pouvoir résister à des conditions qui seraient dangereuses, voire mortelles pour l'homme (gaz nocifs, fortes chaleurs, froid intense).



a. Robots mobiles



b. Robots sous-marins



c. Robots volants



d. Robots humanoïdes



e. Robots manipulateurs

Figure I-1 : Différentes catégories des robots

I.2.2 Historique

- **Naissance de la robotique**

La transition entre les automates et les robots va devenir possible grâce à George Boole. Ce professeur du Queen's College de Cork (Irlande) établit en 1854 le système d'algèbre booléenne, fait de zéro et de un, qui permettra un siècle plus tard l'apparition du premier ordinateur.

Le premier à employer le terme robot est Karel Capek, écrivain et dramaturge tchèque du XX^{ème} siècle. Il utilisa le terme robot dans sa pièce de science-fiction *Rossumovi univerzální roboti* (RUR) écrite en 1920. Il inventa le mot robot à partir du mot «*rabota*» qui signifie «corvée» en slave ancien. De nos jours encore, le mot «*robotnik*» est utilisé en slovaque et polonais pour désigner l'ouvrier. Il faut noter que dans la pièce de Capek, le terme robot désigne un cyborg, c'est-à-dire un être bionique fait à la fois de parties organiques et artificielles, et non pas une créature mécanique.

Enfin, le terme de « robotique » fit sa première apparition dans la nouvelle *Liar* d'Isaac Asimov, publiée en 1941, où le célèbre auteur essaye de trouver les limites des trois lois de la robotique qu'il a lui-même créées.

C'est précisément dans les années 1940 que l'arrivée de l'électronique puis de l'ordinateur vont bouleverser l'évolution de la robotique. Dès 1936, Alan M. Turing énonce le principe de «machine à penser» dans un article intitulé *On Computable Numbers*, où il décrit un système capable de traiter un très grand volume d'informations à une vitesse vertigineuse. De nombreux mathématiciens et informaticiens vont approfondir la question et en 1956, un professeur de l'université de Carnegie Mellon (Pittsburgh), Herbert Simon, conçoit un programme informatique capable de résoudre des théorèmes mathématiques simples. C'est la première fois qu'un système non vivant parvient à simuler un raisonnement logique, marquant ainsi les débuts de l'intelligence artificielle. Allen Newell l'épaulera dans ses travaux d'élaboration de programmes capables de modéliser les activités intellectuelles humaines, notamment grâce à des mécanismes issus de la psychologie.

Parallèlement, des groupes de réflexion se constituent dans le monde entier et donnent naissance à des rencontres scientifiques entre 1942 et 1953 : les conférences de Macy. A

intervalles réguliers, mathématiciens, logiciens, anthropologues, psychologues et économistes se rencontrent à New York pour définir les contours d'une science étudiant les mécanismes de l'esprit humain. De ces congrès naîtra la cybernétique, fondée par un professeur du MIT de Boston, Norbert Wiener, dans son ouvrage *Cybernetic, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cette discipline, définie comme étant la «science générale de la régulation et des communications dans les systèmes naturels et artificiels», a pour objectif l'étude du contrôle automatique des machines.

La cybernétique permet de comprendre les mécanismes sous-jacents à l'exécution d'une tâche. William Grey Walter applique cette théorie à une machine autonome pour étudier les comportements des animaux. Il fabrique Elsie et Elmer, deux tortues mobiles, capables de se déplacer de manière autonome et de se repérer grâce au son et à la lumière par le biais de capteurs photoélectriques.

- **Les robots de première génération**

L'usage de l'intelligence artificielle se démocratise peu à peu et le premier secteur à bénéficier de ces avancées technologiques est l'industrie. Énergétique tout d'abord, avec le bras télé-opéré du français Georges Goertz pour le Commissariat à l'énergie atomique (CEA); puis automobile, lorsqu'en 1962, la General Motors acquiert le premier robot industriel de l'histoire dans son usine du New Jersey. L'Unimate 001 (abréviation de Universal Automation) est un bras mécanique inventé par Georges Devol et Joseph F. Engelberger. Cet outil, de près de deux tonnes et programmé à partir de quelques lignes de code, permettait de déplacer des pièces métalliques lourdes issues de machines de moulage sous pression.

À partir de cette date et jusqu'aux années 1980, la course à la robotique industrielle va se mettre en place aux États-Unis. Les laboratoires de recherche du MIT et de Stanford s'y mettent eux aussi et développent leurs versions du bras articulé. Des entreprises de robotique spécialisées dans les peintures ou les opérations de soudage se créent également : American Machine and Foundry (AMF), Tralfa, Vicarm...

La concurrence asiatique ne tarde pas à pointer le bout de son nez. Des entreprises nippones comme Kawasaki, épaulées par des politiques d'aide à la filière robotique, commencent à produire en série des bras hydrauliques.

Les Asiatiques à l'inverse des Américains ne se préoccupent pas des débats que suscitent l'avènement des robots et créent dès 1971 une association pour le développement de ces

machines qui regroupe quarante-six sociétés membres. L'objectif du gouvernement japonais est clair : devenir le n°1 mondial de la robotique industrielle des dix prochaines années.

- **Des machines plus intelligentes : la 2^{ème} génération**

Au même moment aux Etats-Unis, la méfiance s'installe. Les machines vont-elles remplacer l'homme ? Ou pire, le dépasser ? Pourraient-elles un jour se retourner contre nous ? Certains philosophes et sociologues comme Gilbert Ryle et Hubert Dreyfus s'opposent à ce genre de théories jugées irréalistes tandis qu'Herbert Simon estime que « dès 1985, les machines seront capables d'accomplir n'importe quel travail qu'un humain puisse effectuer ». En 1966 le film de Stanley Kubrick, *2001 : l'odyssée de l'espace*, n'a pas arrangé les choses. Le public découvre sur grand écran HAL 9000, un ordinateur paranoïaque qui prend le dessus sur les hommes.

Les robots industriels se perfectionnent et gagnent en fiabilité. En revanche, quelles que soient leurs performances, cela reste des machines mono-tâches qui ne s'adaptent pas à leur environnement. C'est justement ce point qu'une branche de la recherche va pouvoir creuser à partir des années 1960. Grâce à la percée des capteurs, l'homme commence à fabriquer des robots mobiles capables de réagir face à une situation donnée (et identifiée dans le programme).

Au début, ces robots ressemblent plutôt à un amas hétérogène de composants assemblés ingénieusement. L'ensemble avance, se dirige dans toutes les directions et détecte ce qui l'entoure grâce à une caméra, un télémètre et des cellules photo-électriques.

Les premières plateformes mobiles expérimentales sont baptisées *Beast*, *Shakey* ou *Cart*. Elles déambulent dans les couloirs des laboratoires de recherche de Stanford ou Johns Hopkins (Baltimore). Elles sont loin d'être des bêtes de course puisqu'il leur faut environ une heure de calcul avant d'effectuer un mouvement.

- **La troisième génération : les robots autonomes**

Ce n'est qu'au milieu des années 1970 avec l'arrivée des micro-ordinateurs et des micro-processeurs, que les robots vont pouvoir gravir un échelon supplémentaire de l'intelligence artificielle. Les robots embarquent désormais des composants de taille raisonnable sur lesquels tournent des logiciels de plus en plus perfectionnés, grâce notamment à l'apparition de langages spécifiques comme le Robot Basic en 1984.

Les machines à penser savent enfin développer des comportements face à des situations. Plus qu'agir, leurs caméras, capteurs, logiciels et actionneurs leur permettent d'interagir par eux-mêmes, voire, pour les plus avancés d'entre eux, de modifier leur propre programme.

Wabot-1, le premier robot autonome de l'histoire, a été inventé au Japon, à l'université de Waseda. C'est un robot humanoïde, sans grande ressemblance avec un humain, certes, mais il est capable de marcher, de saisir des objets, d'échanger quelques mots en japonais.

C'est dans cette catégorie que les robots actuels se situent. Ils se diffusent dans tous les domaines et il devient difficile de citer un secteur d'activité qui ne fasse pas appel à eux. Leurs performances (contrôle, comportements, précision, autonomie...) s'améliorent avec l'avancée en parallèle des nouvelles technologies. Dernier exemple en date, cette pile à base de graphène, qui surclasse les batteries existantes en termes d'autonomie, temps de recharge et empreinte écologique (elle est biodégradable).

Au fur et à mesure que la société les accepte et que les technologies avancent, nous pouvons entrevoir l'avenir des robots.

- **Les générations futures de robots**

Sans nous en rendre compte, nous nous déplaçons tous avec un concentré de technologie en poche, nos téléphones mobiles. Il y a là les deux clés de la robotique du futur : miniaturisation et connectivité.

En ce qui concerne la miniaturisation des composants électroniques, cette tendance s'est accélérée ces dernières années grâce à l'avènement des nanotechnologies. On grave désormais les microprocesseurs à une échelle de quelques nanomètres (vingt-deux précisément, pour les Core i3/i5/i7 d'Intel), et des machines d'un nouveau genre devraient faire leur apparition dans le futur : les ordinateurs quantiques. Basée sur les qubits, la mémoire de l'ordinateur ne serait plus constituée uniquement de zéro ou de un, mais de quatre-vingt-onze états distincts. Cette nouvelle génération, plutôt destinée aux chercheurs, aura une capacité de calcul phénoménale.

Un autre point à ne pas négliger du côté des processeurs actuels : l'arrivée des solutions dites open-source, comme la puce Raspberry Pi, l'équivalent d'un ordinateur dans un circuit imprimé de la taille d'une carte de crédit. Pour vingt euros, n'importe qui peut commencer à

programmer un robot. Près de mille unités sont vendues chaque seconde, ce qui laisse présager la naissance de nouvelles vocations chez les jeunes générations.

En termes de connectivité, nous commençons à peine à exploiter les possibilités de l'univers du tout-connecté. Wi-Fi, 4G, WiMax, Bluetooth, RFID, sont les protocoles sur lesquels se basent les objets intelligents de demain. Certains robots exploitent déjà les ressources offertes par les Smartphones, comme cette main bionique contrôlable à partir d'une application à télécharger sur son mobile ou ce bras robot contrôlé à partir de gestes (vidéo) effectués avec un terminal Androïde dans les mains.

Avec Internet, notre relation à l'information a complètement bouleversé nos habitudes. En permanence, l'homme est au cœur de l'information et participe à son accroissement. Des robots toujours plus puissants l'aident dans sa recherche de données et on assiste à l'émergence d'un super cerveau omniscient, souvent assimilé au géant Google, qui pourrait, un jour, être implanté dans le corps humain à travers une puce électronique. L'homme du futur sera peut-être celui-là...

Le courant transhumaniste défend l'idée que la technologie s'accélère de façon exponentielle. Pour que l'homme puisse la suivre, il faudra qu'il soit augmenté et passera peut-être par une espèce d'homme artificiel hybride. La prudence est de mise puisque cela reposera avant tout sur les découvertes technologiques des trente années à venir et une réflexion éthique profonde.

I.2.3 Robots manipulateurs

Un bras manipulateur est le bras d'un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Les segments de ce manipulateur sont reliés par des axes permettant, soit le mouvement de rotation ou de translation. Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut être aussi utilisé pour effectuer une variété de tâches avec une grande précision.

Les bras manipulateurs peuvent être fixes ou mobiles, c'est-à-dire à roue, et peuvent être conçus pour des applications diverses, tel que l'industrie, médecine,..., etc. [1]. La figure suivante donne quelques exemples d'application des robots manipulateurs.



a. Robot Assistance aux personnes handicapées



b. Robot chirurgien



c. Industrie agro-alimentaire



d. Robot de construction

Figure I-2 : Exemples de domaine d'application des bras manipulateurs.

I.2.3.1. Constituants mécaniques

Un robot manipulateur est un système électromécanique capable d'interagir avec son environnement. Il est constitué par deux parties distinctes: une structure mécanique articulée, et un ou plusieurs organes terminaux.

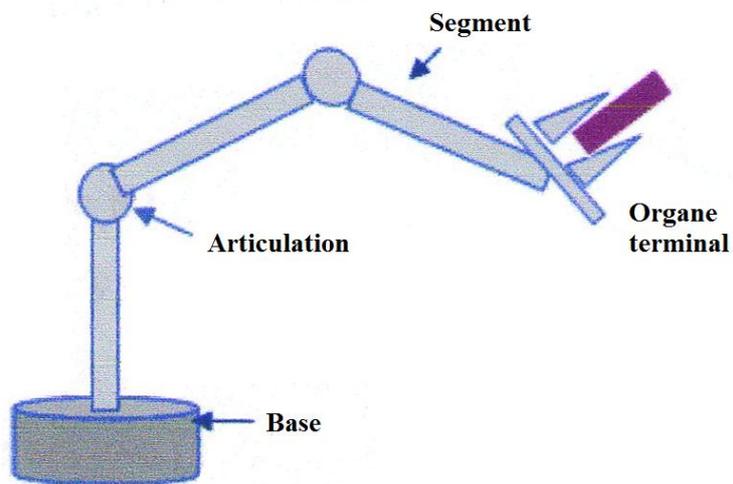


Figure I-3: Schéma d'un bras manipulateur

I.2.3.2. Organe terminal

C'est un dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique du bras manipulateur, il regroupe les procédés destinés à manipuler des objets ou à les transformer. Un organe terminal peut être multifonctionnel, c'est-à-dire qu'il est équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes ou monofonctionnelles, mais interchangeables.

I.2.3.3. Structure mécanique articulée

Le rôle de la structure mécanique articulée est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est sous forme de chaîne cinématique de corps généralement rigides assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être soit ouvertes simples, Figure (I-4-a), soit arborescentes, Figure (I-4-b), soit fermées, Figure (I-4-c).

Dans notre projet, nous allons considérer un robot manipulateur ayant une structure ouverte simple.

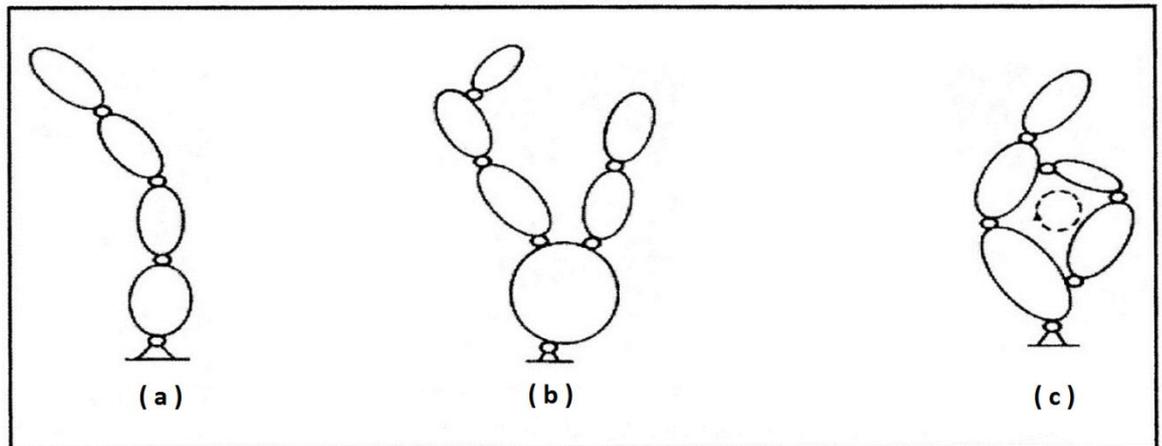


Figure I-4 : Chaînes cinématiques ouverte (a), arborescentes (b) et fermée (c).

I.2.3.4 Articulation

L'articulation est l'organe qui lie deux segments successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degrés de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité est telle que $0 < m < 6$. Lorsque $m=1$, ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est soit rotoïde, soit prismatique.

a- Articulation rotoïde (notée R)

C'est une articulation de type pivot, Figure (I-5), ayant comme principe la réduction du mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe. Ce qui donne comme résultante un angle de rotation autour de cet axe.

b- Articulation prismatique (notée P)

C'est une articulation de type glissière, Figure (I-6), réduisant le mouvement entre corps à une translation le long d'un axe commun, ce qui signifie qu'il se produira un déplacement linéaire mesuré par une distance le long de cet axe.

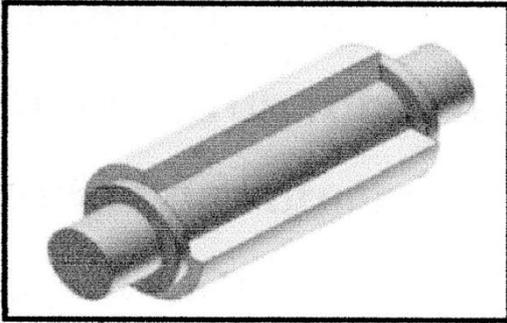


Figure I-5 : Articulatio n rotoïde

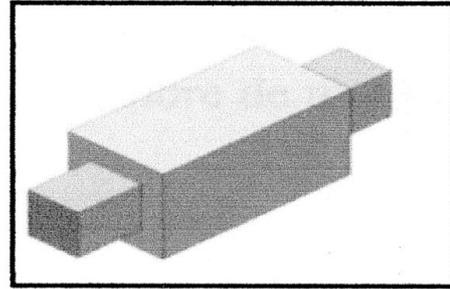


Figure I-6 : Articulatio n prismatique

I.2.3.5. Espace de travail des robots manipulateurs

L'espace de travail est défini comme le lieu des points pouvant être atteints par l'extrémité du bras, ou un point du poignet. Nous donnons par la suite quelques exemples des espaces de travail suivant la configuration des robots manipulateurs utilisés.

a- Espace articulaire

L'espace articulaire d'un robot est celui dans lequel est représentée la situation de tous les corps. Pour représenter celle-ci, la solution adoptée consiste à associer à chaque articulation une ou plusieurs variables appelées variables articulaires ou coordonnées articulaires [2].

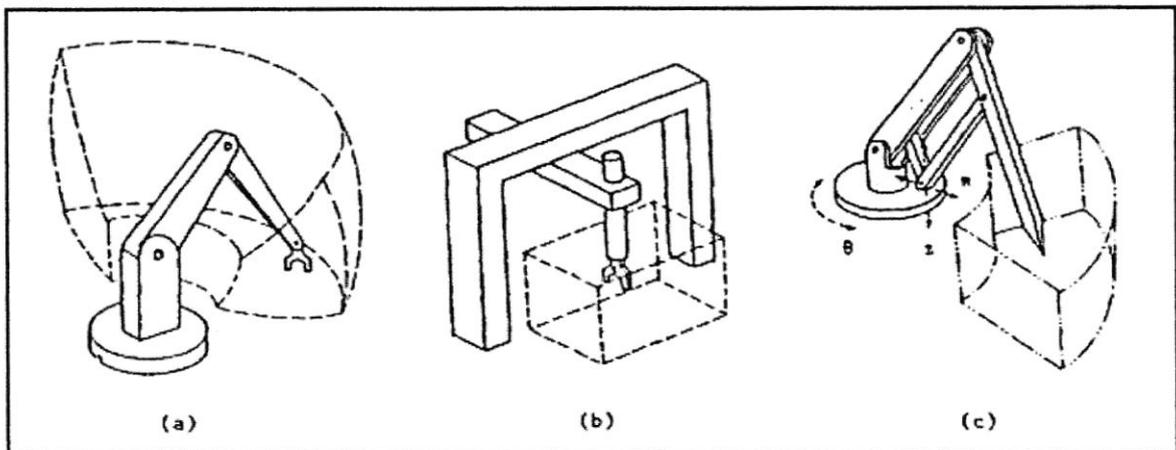


Figure I-7 : Espace de travail des robots manipulateurs

b- Espace opérationnel

L'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'effecteur (organe terminal). La solution la plus simple consiste à utiliser les coordonnées cartésiennes pour la position et les rotations pour l'orientation. [2]

I.2.3.6. Redondance

C'est une situation dans laquelle le nombre de degré de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulation. [2]

I.2.3.7. Configurations singulières

Pour tous les robots redondants ou pas, il existe des configurations dites singulières pour lesquelles le nombre de degré de liberté de l'organe terminal est inférieur à la dimension de l'espace opérationnel. [2]

I.2.3.8 Degré de liberté (ddl)

Le degré de liberté d'un robot manipulateur est égal au nombre de mouvements indépendants qui fixent la situation de l'organe terminal.

I.2.3.9. Générations de robot

Nous pouvons distinguer trois générations (grandes familles) de robots manipulateurs [3] :

a- Robot passif

Ce type de robot est capable d'exécuter une tâche qui peut être complexe de manière répétitive, et il ne doit pas y avoir de modifications intempestives de l'environnement.

b- Robot actif

Ce robot est capable d'avoir une image de son environnement, et par la suite il peut choisir le bon comportement (sachant que les différentes configurations ont été prévues). Le robot peut se calibrer tout seul.

c- Robot intelligent

Cette catégorie des robots est capable d'établir des stratégies, ce qui fait appel à des capteurs sophistiqués, et souvent à l'intelligence artificielle.

I.3. Les types de robot manipulateur

I.3.1 Robot cartésien

- Constitués uniquement d'axes en translation ;
- Axes perpendiculaires 2 à 2 ;
- Commande simplifiée ;
- Possibilité d'insérer un poignet pour ajouter des d.d.l. en rotation;
- Portique : grand encombrement ;
- Guidage et mesure de précision .



Figure I-8 : Robot Cartésien

I.3.2 Robot cylindrique

- Coordonnées cylindriques;
- 3 axes (articulations) ;
- Robot très rapides



Figure I-9 : Robot cylindrique

I.3.3 Robot SCARA

- SCARA : sélective complaisance ;
- 4 axes (articulations) ;
- Robot très rapide et précis;
- Plutôt bon marché .



Figure I-10 : Robot SCARA

I.3.4 Robots parallèles[4].

- Plusieurs chaînes cinématiques en parallèle;
- Grande rigidité;
- Légers et rapides (moteurs sur base fixe);
- Effort importants;
- Petit espace de travail



Figure I-11 : Robot parallèles

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une brève présentation de la robotique en général et un peu d'histoire, en donnant quelques définitions sur les architectures mécaniques des robots ainsi que leurs domaines d'utilisations.

Les renseignements acquis dans ce présent chapitre nous permettront de décrire le bras manipulateur utilisé dans ce travail afin de déterminer son modèle dynamique, cela fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Modélisation du robot manipulateur

II.1. Introduction

Dans l'automatique, modéliser un système consiste à établir un ensemble de relations mathématiques qui permettent de décrire avec précision suffisante les interactions entre ce système et son environnement extérieur. Lorsque les relations sous citées sont issues de la physique, le modèle obtenu est dit modèle de connaissance, ces relations découlent des observations disponibles sur le système.

La modélisation du système mécanique articulé consiste à représenter son comportement par des équations algébriques, soit du point de vue des positions, c'est le modèle géométrique, soit du point de vue des vitesses, c'est le modèle cinématique, soit encore en considérant les efforts mis en jeux, c'est le modèle dynamique.

Dans ce chapitre, nous allons déterminer le modèle dynamique nécessaire à l'étude de notre système considéré.

II.2. Présentation de robot manipulateur à 2DDL

Le robot que nous avons considéré dans ce travail est destiné au domaine industriel dont le rôle exécute des tâches souvent en se substituant au bras humain.

Le robot manipulateur que nous nous proposons modélisé est un bras manipulateur à 2ddl caractérisé par deux articulations rotationnelles et un organe terminal.

Le mouvement des deux articulations est rotoïde dont la rotation est assurée par des moteurs qui délivrent le couple moteur nécessaire à entrainer le bras correspondant. C'est un robot conventionnel car chaque moteur est responsable du mouvement rotoïde du bras dont il appartient.

II.3. Modélisation d'un bras manipulateur à 2 ddl

Nous allons d'abord déterminé le modèle géométrique du robot afin de prouver qu'il n'y a pas problème de singularité. Nous utilisons ensuite la méthode d'Euler-Lagrange pour déterminer le modèle dynamique gouvernant ce robot [5].

II.3.1 Modèle dynamique du robot

Les modèles dynamiques des bras manipulateurs sont décrits par un ensemble d'équations mathématiques qui portent des informations dynamiques de ces manipulateurs et peuvent être simulées sur un ordinateur dans le but est de synthétiser une commande conditionnée par des performances désirées. L'ensemble des équations dynamiques peut être déterminé par des lois mécaniques classiques Newtoniennes et Lagrangiennes. Les approches d'Euler-Lagrange et Newton-Euler permettent d'aboutir aux équations du mouvement des robots. [6]

Nous avons opté pour le formalisme d'Euler-Lagrange pour déterminer le modèle dynamique du robot manipulateur à 2ddl. Ce formalisme décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du robot. La forme général représentant le mouvement d'un robot manipulateur constitue de n degrés de liberté et de n articulations, s'écrit suivant Lagrange :

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} \quad (i=1 \dots n) \quad \text{(II-1)}$$

Avec :

Γ_i : représente couple ou force (N.m);

L : Lagrangien du système égal à $E_c - E_p$;

E_c : énergie cinétique total du système ;

E_p : énergie potentielle total du système ;

$q \in \mathbb{R}^n$: Vecteur des positions articulaires (rad);

$\dot{q} \in \mathbb{R}^n$: Vecteur des vitesses articulaires (rad/s) .

Dans le cas d'une articulation rotoïde $q_i \equiv \theta_i$, tandis que pour une articulation prismatique $q_i = d_i$.

Dans notre travail, nous avons considéré un robot manipulateur à 2ddl, donné par Figure (II-1), dont le mouvement des articulations est rotoïde, nous avons donc $q_i \equiv \theta_i$

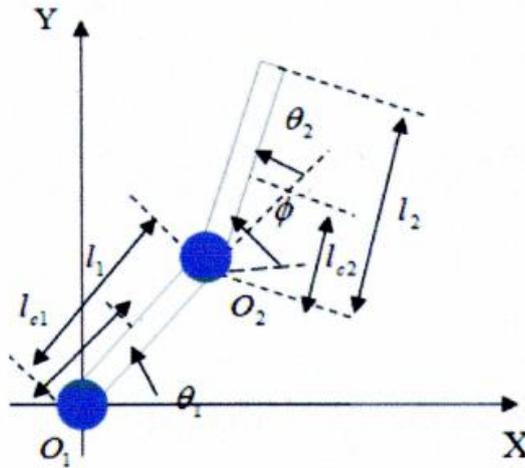


Figure II-1 : Robot à deux degrés de liberté.

Tel que :

l_i : Longueur du segment i ;

l_{ci} : Longueur du centre de gravité du segment i ;

θ_i : La position angulaire de l'articulation i ;

ϕ : $\theta_1 + \theta_2$;

A partir de la Figure (II-1), nous déterminons les coordonnées du bras manipulateur par rapport au repère oxy , ce qui donne :

$$\begin{cases} x_1 = l_{c1} \cos \theta_1 \\ y_1 = l_{c1} \sin \theta_1 \end{cases} \quad \text{(II-2)}$$

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos \phi \\ y_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin \phi \end{cases} \quad \text{(II-3)}$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -l_{c1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_1 = l_{c1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \dot{x}_1^2 = l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \theta_1 \\ \dot{y}_1^2 = l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -(l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \dot{\phi} \sin \phi) \\ \dot{y}_2 = l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \dot{\phi} \cos \phi \end{cases}$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} \dot{x}_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \theta_1 + l_{c2}^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \phi + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\phi} \sin \phi \sin \theta_1 \\ \dot{y}_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_1 + l_{c2}^2 \dot{\phi}^2 \cos^2 \phi + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\phi} \cos \phi \cos \theta_1 \end{cases}$$

II.3.1.1 Application du Formalisme d'Euler-Lagrange

La modélisation du robot se fait par l'application du formalisme d'Euler-Lagrange dont l'équation générale est donnée précédemment. Cela permet d'obtenir directement les équations d'évolution des couples appliqués. Nous avons $L = E_c - E_p$ [6].

a- Détermination de l'énergie cinétique E_c

$$E_c = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (\text{II-4})$$

Ce qui donne:

$$E_c = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + I_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$$\begin{cases} v_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 = l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \\ v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + 2l_{c2}^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

L'équation (II-5) devient:

$$E_c = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + I_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + 2l_{c2}^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2) \quad (\text{II-7})$$

b- Détermination de l'énergie potentielle E_p .

$$E_p = m_1 g h_1 + m_2 g h_2 \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$\begin{cases} h_1 = y_1 = l_{c1} \sin \theta_1 \\ h_2 = y_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

L'équation (II-8) devient :

$$E_p = m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \quad (\text{II-10})$$

c-Détermination de Lagrangien L

$$L = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + I_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 - m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 - m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \quad (\text{II-11})$$

d-Détermination du modèle dynamique du robot

Nous appliquons maintenant l'équation d'Euler-Lagrange donnée par l'équation (II-1) pour déterminer le modèle dynamique correspondant au robot manipulateur à 2ddl, soit :

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (\text{II-12})$$

Nous avons :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -m_1 g (l_{c1} \cos \theta_1) - m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)) \quad (\text{II-13})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 \dot{\theta}_1 + I_2 \dot{\theta}_2 + m_1 l_{c1}^2 \dot{\theta}_1 + m_2 (l_1^2 \dot{\theta}_1 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_1 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2)$$

(II-14)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= I_1 \ddot{\theta}_1 + I_2 \ddot{\theta}_1 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_1 l_{c1}^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 (l_1^2 \ddot{\theta}_1 + l_{c2}^2 \ddot{\theta}_1 + l_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 \\ &\quad + 2l_1 l_{c2} \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - 2l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + l_1 l_{c2} \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - l_1 l_{c2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (\text{II-15})$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} &= (I_1 + I_2 + m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2)) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 (l_{c2}^2 + \\ &\quad 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2)) \ddot{\theta}_2 + (-2m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2(-m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_1 g l_{c1} \cos \theta_1 + m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + \\ &\quad l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned} \quad (\text{II-16})$$

Nous avons aussi :

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2 (l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2) - m_2 g l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{II-17})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = I_2 \dot{\theta}_2 + I_2 \dot{\theta}_1 + m_2 (l_{c2}^2 \dot{\theta}_2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_1 + l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_2) \quad (\text{II-18})$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= I_2 \ddot{\theta}_2 + I_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 (l_{c2}^2 \ddot{\theta}_2 + l_{c2}^2 \ddot{\theta}_1 + l_1 l_{c2} \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (\text{II-19})$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} &= (I_2 + m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2)) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 l_{c2}^2) \ddot{\theta}_2 + \\ &\quad (m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1^2 - m_2 g l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (\text{II-20})$$

A partir de l'équation (II-12), nous avons

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \\ \tau_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

En robotique, si le mouvement des articulations constituant le robot manipulateur est rotoïde, l'expression du couple peut être s'exprimé sous la forme matricielle suivante, ce qui correspondant au modèle dynamique du robot [6]:

$$\Gamma_i = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta), \quad (i = 1,2) \quad (\text{II-22})$$

Avec :

Γ_i : Vecteur des couples ou des forces généralisés (N.m).

θ : Vecteur des variables articulaires du bras manipulateur (rad).

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires (rad/s).

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaires (rad/s²).

$M(\theta)$: Matrices d'inertie de dimension (n×n).

$C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$: Vecteur des forces centrifuges et de Coriolis.

$G(\theta)$: Vecteur de force de gravité de la charge.

Soit $\Gamma_i = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$.

Le développement de l'équation (II-21) donne :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2h_{122}\dot{\theta}_2 & h_{211}\dot{\theta}_2 \\ h_{211}\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_1 \\ \mathcal{G}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \tau_1 = M_{11}\ddot{\theta}_1 + M_{12}\ddot{\theta}_2 + h_{122}\dot{\theta}_2^2 + 2h_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \mathcal{G}_1 \\ \tau_2 = M_{21}\ddot{\theta}_1 + M_{22}\ddot{\theta}_2 + h_{211}\dot{\theta}_1^2 + \mathcal{G}_2 \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

L'identification de l'équation (II-21) et l'équation (II-23) permet de définir les éléments suivants :

$$M_{11} = I_1 + I_2 + m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2).$$

$$M_{12} = M_{21} = I_2 + m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2).$$

$$M_{22} = I_2 + m_2 l_{c2}^2.$$

$$h_{122} = h_{112} = -h_{211} = -m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2.$$

$$\mathcal{G}_1 = m_1 g (l_{c1} \cos \theta_1) + m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)).$$

$$\mathcal{G}_2 = m_2 g l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2).$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier la structure du robot manipulateur à 2ddl utilisé dans notre travail. Nous avons déterminé ensuite son modèle dynamique en appliquant le formalisme d'Euler –Lagrange.

Afin de valider le modèle obtenu du robot, nous allons lui appliqué des lois de commandes robustes. Cela fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Commande d'un robot par Backstepping

III.1. Introduction

La conception d'un régulateur dépend essentiellement de la nature du système et de la qualité des performances exigées. Cependant l'amélioration des performances des systèmes commandés exige des modélisations de plus en plus précises et les modèles résultant sont souvent non linéaire. Dans ce cas les outils fondamentaux de la synthèse des lois de commande dans le domaine linéaire deviennent insuffisants pour cela on fait recours à de nouvelles méthodes non linéaires.

Depuis quelques années, beaucoup de recherche ont été effectuées dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires ce qui a donné naissance à plusieurs types de régulateurs et qui sont disponibles dans la littérature. Parmi ces régulateurs Le backstepping fait partie de ces nouvelles méthodes de contrôle non linéaire et robuste [7].

Dans ce chapitre on présente le principe de la commande par backstepping ainsi que son application pour le robot [8].

III.2. Conception de la loi de commande backstepping

La commande non linéaire a fait son apparition dans les années 1980 avec les travaux d'Isidori [7] et la technique du backstepping (commande stabilisante non linéaire) a été proposée au début des années 90. Cette commande a reçu beaucoup d'attention, grâce aux travaux du professeur V. Kokotovic et ses collaborateurs [9]-[12]. L'historique du backstepping est résumé dans [13] et l'approche y est largement approfondie.

Cette commande robuste est dédiée aux systèmes non linéaires dont l'idée de base consiste à calculer une loi de commande afin de garantir la stabilité du système à commander dans le sens de Lyapunov [14].

Le backstepping consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant. Pour chaque sous système, il faut chercher, à l'aide d'une fonction de Lyapunov, une commande qui permet de stabiliser ce sous-système. Pour cela chaque état précédent est considéré comme une variable manipulable. L'ordre du sous-système est ensuite augmenté et le développement précédent sera recommencé pour trouver enfin une loi de commande correspondante au sous-système. Nous donnons par la suite les étapes à suivre pour le développement de la commande backstepping pour un sous-système à deux degré de liberté [15].

1^{er} étape :

Le système à réguler doit suivre une trajectoire donnée. Cela revient à concevoir un contrôleur qui permet d'assurer la poursuite de la référence notée y_{ref} . L'erreur de cette poursuite est donnée par:

$$e_1 = y_{ref} - x_1 \quad (\text{III-1})$$

et sa dérivée s'écrit :

$$\dot{e}_1 = \dot{y}_{ref} - \dot{x}_1 \quad (\text{III-2})$$

$$\dot{e}_1 = \dot{y}_{ref} - x_2 \quad (\text{III-3})$$

La fonction candidate de Lyapunov choisi est donnée par :

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{III-4})$$

Avec :

v_1 : Fonction de Lyapunov qui représente, en quelque sorte, l'énergie de l'erreur. Or si cette fonction est toujours positive (ce qui est le cas présent dans cet exemple) et que sa dérivée est toujours négative, alors l'erreur e_1 va être stable et tendre vers zéro.

La dérivée de la fonction (III-4) s'écrit comme suit :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (\text{III-5})$$

$$\dot{v}_1 = e_1 (\dot{y}_{ref} - x_2) \quad (\text{III-6})$$

Pour que la dérivée de la fonction de Lyapunov, donnée par (III-6), soit toujours négative, il faut qu'elle écrit sous la forme :

$$\dot{v}_1 = -c_1 e_1^2 \quad (\text{III-7})$$

Avec c_1 est un paramètre de conception positif, cela conduit à la stabilité de l'erreur.

L'égalité entre les deux équations (III-6) et (III-7) donne

$$\dot{y}_{ref} - x_2 = -c_1 e_1 \quad (\text{III-8})$$

d'où

$$x_2 = \dot{y}_{ref} + c_1 e_1 \quad (\text{III-9})$$

L'équation (III-9) indique la valeur que doit prendre l'état x_2 pour que la fonction de Lyapunov soit stable. Cependant, il est impossible d'agir directement sur l'état x_2 . La notion x_{2det} sera donc utilisée pour indiquer la valeur souhaitée (déterminée) de l'état x_2 donné par :

$$x_{2det} = \dot{y}_{ref} + c_1 e_1 \quad \text{(III-10)}$$

et sa dérivée est donnée par :

$$\dot{x}_{2det} = \ddot{y}_{ref} + c_1 \dot{e}_1 \quad \text{(III-11)}$$

2^{ème} étape :

Le fait qu'on ne peut pas agir directement sur l'état x_2 , il est donc peu probable que cet état suit exactement sa référence. Pour cela, on considère x_{2det} donnée par (III-10) comme la référence de x_2 . et l'erreur de la poursuite de cet état est donné par :

$$e_2 = x_{2det} - x_2 \quad \text{(III-12)}$$

x_{2det} sera remplacée par sa valeur donnée par (III-10), (III-12) devient:

$$e_2 = \dot{y}_{ref} + c_1 e_1 - x_2 \quad \text{(III-13)}$$

L'utilisation des équations de l'étape 1 donne :

$$e_2 = \dot{y}_{ref} - \dot{x}_1 + c_1 e_1 \quad \text{(III-14)}$$

$$e_2 = \dot{e}_1 + c_1 e_1 \quad \text{(III-15)}$$

$$\dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 \quad \text{(III-16)}$$

La dérivée de l'erreur de la poursuite e_2 est donnée par :

$$\dot{e}_2 = \ddot{y}_{ref} + c_1 \dot{e}_1 - \dot{x}_2 \quad \text{(III-17)}$$

$$\dot{e}_2 = \ddot{y}_{ref} + c_1 \dot{e}_1 + b x_1 - C u(t) \quad \text{(III-18)}$$

la fonction de Lyapunov, cette fois-ci est augmentée d'un autre terme qui vient prendre en considération l'erreur possible sur l'état x_2 . Voici la nouvelle fonction candidate :

$$v_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (\text{III-19})$$

En effectuant la dérivée de cette fonction et en utilisant l'équation (III-16) et (III-18), cela donne les relations suivantes:

$$\dot{v}_2 = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 \quad (\text{III-20})$$

$$\dot{v}_2 = e_1(e_2 - c_1e_1) + e_2(\dot{y}_{ref} + c_1e_2 - c_1^2e_1 + bx_1 - Cu(t)) \quad (\text{III-21})$$

$$\dot{v}_2 = -c_1e_1^2 + e_2(e_1(1 - c_1^2) + c_1e_2 - Cu(t) + bx_1 + \dot{y}_{ref}) \quad (\text{III-22})$$

Pour que les critères de Lyapunov soient respectés (négatif), il faut que :

$$\dot{v}_2 = -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 \quad (\text{III-23})$$

De cette façon la fonction v_1 respecterait en tous points les critères de Lyapunov. La loi de commande déduite fait en sorte que \dot{v}_2 soit toujours positif et que v_2 soit toujours négatif, et cela quelle que soit les valeurs que peuvent prendre les états du système.

L'égalité des deux équations (III-22) et (III-23) donne enfin la loi de commande $u(t)$ donnée par :

$$u(t) = [(c_1c_2 + 1)e_1 + (c_1 + c_2)\dot{e}_1 + \ddot{y}_{ref}]C^{-1} + C^{-1}bx_1 \quad (\text{III-24})$$

III.3 Application de la commande backstepping au robot

III.3.1 Backstepping sans l'action intégrale

Le modèle dynamique du robot golfeur a été déterminé dans le chapitre précédent. La commande backstepping va être appliquée à ce robot dont les étapes correspondantes sont les suivants :

- **Loi de commande backstepping pour le 1^{er} segment (1^{er} sous-système)**

Représentation d'état du 1^{er} segment

Soit $x = [x_1 \ x_2] = [\theta_1 \ \dot{\theta}_1]$ vecteur d'état du 1^{er} sous système, ce qui donne la représentation d'état correspondante suivante :

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta}_1 = x_2 \quad (\text{III-25})$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta}_1 = M^{-1}(\tau - h\dot{\theta}_1 - G) \quad (\text{III-26})$$

Etape 1

Soit x_{1d} la trajectoire de référence de x_1 et l'erreur de position de θ_1 est donc :

$$e_1 = x_{1d} - x_1 \quad (\text{III-27})$$

Et sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (\text{III-28})$$

On a $\dot{x}_1 = x_2$, l'équation (III.27) devient :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (\text{III-29})$$

La fonction de Lyapunov candidate est :

$$v_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (\text{III-30})$$

Il est clair que la fonction de Lyapunov donnée par (III-30) est positive et il faut garantir que sa dérivée soit négative pour que le 1^{er} sous système soit stable. On a :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 \quad (\text{III-31})$$

En substituant l'équation (III -30) dans (III -31), on trouve :

$$\dot{v}_1 = e_1(\dot{x}_{1d} - x_2) \quad (\text{III-32})$$

La fonction de Lyapunov doit prendre la valeur suivante pour qu'elle soit négative :

$$\dot{v}_1 = -k_1 e_1^2 \quad (\text{III-33})$$

Avec k_1 est une constante positive.

En utilisant (III-33) et (III-34) on obtient:

$$-k_1 e_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (\text{III-34})$$

On trouve alors :

$$x_2 = \dot{x}_{1d} + k_1 e_1 \quad (\text{III-35})$$

L'équation (III-35) représente une commande virtuelle qui va être utilisée comme une référence de trajectoire dans la 2^{eme} étape, Soit $x_2 = x_{2d}$.

2^{eme} étape

Etant donné l'erreur de poursuite de x_2 :

$$e_2 = x_{2d} - x_2 \quad (\text{III-36})$$

En utilisant les équations développées dans l'étape 1 pour déterminer les relations suivantes :

$$e_2 = \dot{x}_{1d} + k_1 e_1 - \dot{x}_2 \quad (\text{III-37})$$

$$e_2 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 + k e_1 \quad (\text{III-38})$$

$$e_2 = \dot{e}_1 + k_1 e_1 \quad (\text{III-39})$$

$$\dot{e}_1 = e_2 - k_1 e_1 \quad (\text{III-40})$$

$$\dot{e}_2 = k_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_2 \quad (\text{III-41})$$

La fonction de Lyapunov candidate est augmentée par un terme, ce qui donne :

$$v_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{III-42})$$

Et sa dérivée \dot{v}_2 égale à :

$$\dot{v}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (\text{III-43})$$

Le développement de cette équation donne :

$$\dot{v}_2 = e_1 (e_2 - k_1 e_1) + e_2 (k_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_2) \quad (\text{III-44})$$

$$\dot{v}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 (k_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} - \ddot{x}_2 + e_1) \quad (\text{III-45})$$

Pour que le 1^{er} sous système soit stable il faut que $\dot{v}_2 < 0$. Pour cela il faut que $\dot{v}_2 = (-k_2 e_2)$ avec k_2 est une constante positive, ce qui donne :

$$\dot{v}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad (\text{III-46})$$

L'égalité entre(III-45) et (III-46) donne :

$$\dot{x}_2 = k_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + e_1 + k_2 e_2 \quad (\text{III-47})$$

L'égalité entre (III-29) et(III-47) donne le développement suivant qui va aboutir à la détermination de la commande (couple) τ_1 du 1^{er} segment :

$$M^{-1}(\tau_1 - h\dot{\theta}_1 - G) = k_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + e_1 + k_2 e_2 \quad (\text{III-48})$$

$$\tau_1 = h\dot{\theta}_1 + G + M(\dot{e}_1 T_{d1} + \ddot{x}_{1d} + e_1 K_{c1}) \quad (\text{III-49})$$

Avec :

$$T_{d1} = (k_1 + k_2) \quad (\text{III-50})$$

$$K_{c1} = (1 + k_1 k_2) \quad (\text{III-51})$$

- **Loi de commande backstepping pour le 2^{ème} segment (2^{ème} sous-système)**

Représentation d'état du 2^{ème} segment

Soit $x = [x_3 \ x_4] = [\theta_2 \ \dot{\theta}_2]$ vecteur d'état du 2^{er} sous système, ce qui donne la représentation d'état correspondante suivante:

$$\dot{x}_3 = \dot{\theta}_2 = x_4 \quad (\text{III-52})$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{\theta}_2 = M^{-1}(\tau - h\dot{\theta}_2 - G) \quad (\text{III-53})$$

La détermination de la loi de commande de ce 2^{ème} segment a été développée en suivant les mêmes étapes lors de la détermination de la commande du 1^{er} segment, ce qui aboutit à :

$$\tau_2 = h\dot{\theta}_2 + G + M(\dot{e}_3 T_{d2} + \ddot{x}_{3d} + e_2 K_{c2}) \quad (\text{III-54})$$

Avec

$$T_{d2} = (k_3 + k_4) \quad (\text{III-55})$$

$$K_{c2} = (1 + k_3 k_4) \quad (\text{III-56})$$

Nous obtenons enfin la loi de commande backstepping du robot golfeur donnée par :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_1 T_{d1} + \ddot{x}_{1d} + e_1 K_{c1} \\ k_3 \dot{e}_3 + \ddot{x}_{3d} - \dot{x}_4 + e_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (\text{III-57})$$

III.3.2 Backstepping avec l'action intégrale

- **Loi de commande pour le 1^{er} segment**

Le développement de la loi de commande backstepping avec action intégrale se fait en suivant les mêmes étapes de la commande backstepping sans intégrale et en introduisant l'action intégrale au niveau de la commande virtuelle de la 1^{ere} étape.

Alors x_2 devient :

$$e_1 = \theta_{1d} - \theta_1 + \lambda_1 \int (\theta_{1d} - \theta_1) \quad (\text{III-58})$$

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 + \lambda_1 (x_{1d} - x_1) \quad (\text{III-59})$$

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 + \lambda_1 (x_{1d} - x_1) \quad (\text{III-60})$$

La fonction de Lyapunov candidate est:

$$v_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (\text{III-61})$$

$$\dot{v}_1 = e_1\dot{e}_1 \quad (\text{III-62})$$

$$\dot{v}_1 = e_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_2 + \lambda_1(x_{1d} - x_1)) \quad (\text{III-63})$$

$$\dot{x}_{1d} - \dot{x}_2 + \lambda_1(x_{1d} - x_1) = -k_1e_1 \quad (\text{III-64})$$

$$\dot{x}_2 = k_1e_1 + \dot{x}_{1d} + \lambda_1(x_{1d} - x_1) \quad (\text{III-65})$$

2^{ème} étape

$$e_2 = x_{2ref} - x_2 \quad (\text{III-66})$$

$$e_2 = k_1e_1 + \dot{x}_{1d} + \lambda_1(x_{1d} - x_1) - \dot{x}_2 \quad (\text{III-67})$$

$$e_2 = k_1e_1 + \dot{e}_1 \quad (\text{III-68})$$

$$\dot{e}_1 = e_2 - k_1e_1 \quad (\text{III-69})$$

$$\dot{e}_2 = k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) - \ddot{x}_2 \quad (\text{III-70})$$

La fonction de Lyapunov candidate est:

$$v_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (\text{III-71})$$

$$\dot{v}_2 = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 \quad (\text{III-72})$$

$$\dot{v}_2 = e_1(e_2 - k_1e_1) + e_2(k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) - \ddot{x}_2) \quad (\text{III-73})$$

$$\dot{v}_2 = -k_1e_1^2 + e_2[(e_1 + k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) - \ddot{x}_2)] \quad (\text{III-74})$$

Le terme entre crocher doit être égale à $(-k_2e_2)$

$$(e_1 + k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) - \ddot{x}_2) = -k_2e_2 \quad (\text{III-75})$$

$$\dot{x}_2 = k_2e_2 + e_1 + k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) \quad (\text{III-76})$$

$$\dot{x}_2 = k_2(k_1e_1 + \dot{e}_1) + e_1 + k_1\dot{e}_1 + \ddot{x}_{1d} + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) \quad (\text{III-77})$$

$$\dot{x}_2 = (k_1k_2 + 1)e_1 + e_1 + (k_1 + k_2)\dot{e}_1 + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) + \ddot{x}_{1d} \quad (\text{III-78})$$

D'après l'équation (III-26) on trouve

$$\tau_1 = h\dot{\theta}_1 + G + M((k_1k_2 + 1)e_1 + e_1 + (k_1 + k_2)\dot{e}_1 + \lambda_1(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) + \ddot{x}_{1d}) \quad (\text{III-79})$$

$$\tau_1 = h\dot{\theta}_1 + G + M(K_{p1}e_1 + K_{d1}\dot{e}_1 + K_{i1}(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) + \ddot{x}_{1d}) \quad (\text{III-80})$$

Avec :

$$K_{p1} = (k_1k_2 + 1) \quad (\text{III-81})$$

$$K_{d1} = (k_1 + k_2) \quad (\text{III-82})$$

$$K_{i1} = \lambda_1 \quad (\text{III-83})$$

- **Loi de commande pour le 2^{ème} segment**

La détermination de la loi de commande de ce 2^{ème} segment a été développée en suivant les mêmes étapes lors de la détermination de la commande du 1^{er} segment, ce qui donne:

$$\tau_2 = h\dot{\theta}_2 + G + M((k_3k_4 + 1)e_3 + e_3 + (k_3 + k_4)\dot{e}_3 + \lambda_2(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_3) + \ddot{x}_{3d}) \quad (\text{III-84})$$

$$\tau_2 = h\dot{\theta}_2 + G + M(K_{p2}e_3 + K_{d2}\dot{e}_3 + K_{i2}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_3) + \ddot{x}_{3d}) \quad (\text{III-85})$$

Avec :

$$K_{p2} = (k_3k_4 + 1) \quad (\text{III-86})$$

$$K_{d2} = (k_3 + k_4) \quad (\text{III-87})$$

$$K_{i2} = \lambda_2 \quad (\text{III-88})$$

III.4 Résultat des simulations

Nous allons appliquer, au robot manipulateur, la commande robuste backstepping dont on a développé précédemment (avec et sans l'action intégrale) en présence de deux types de perturbations. Ces dernières sont le bruit de mesure causé par le capteur de position et la variation des paramètres du bras manipulateur.

Nous avons utilisé logiciel Matlab comme outil informatique pour simuler la commande backstepping du robot manipulateur.

Les trajectoires de références utilisées dans la simulation ont été déterminées ultérieurement dans le cadre d'une thèse de doctorat [16].

Les paramètres correspondant au robot sont donnés par le tableau suivant [16]:

	1er Bras	2ème bras
longueur (m)	0.4	0.95
Masse (Kg)	4.5	1.4
Moment d'inertie (Kg.m ²)	0.27	3.3 * 10⁻³

Tab III-1 Paramètres du robot manipulateur

Les coefficients caractérisant la commande appliquée, backstepping, sont choisis convenablement afin de garantir la stabilité du système ainsi que la robustesse de la commande vis-à-vis la perturbation prises en compte.

III-4-1 Sensibilité de la commande au bruit de mesure

Nous avons analysé en premier lieu la sensibilité de la commande robuste, backstepping, appliquée au robot, en présence du bruit de mesure. Le schéma bloc suivant illustre l'application de cette commande au robot :

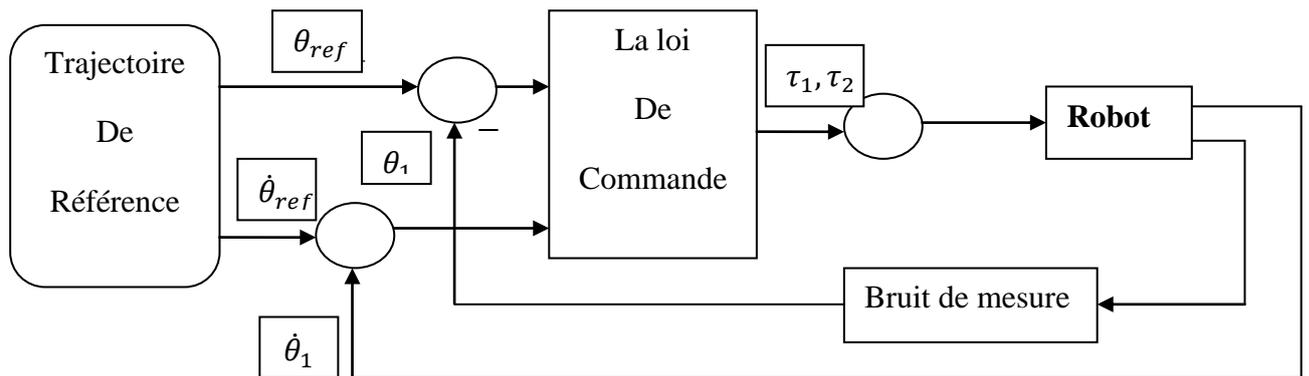


Figure III-1 Schéma bloc de la commande backstepping avec bruit de mesure

Les figures (III- 2, 3, 4, 5, 6, 7) suivantes montrent les résultats de simulation obtenus dont les paramètres du régulateur sont représentés dans le tableau suivant :

Les paramètres	k_1	k_2	k_3	k_4
La valeur	10	20	10	45

Tab III-2 Les paramètres de la commande backstepping appliquées au robot en présence de bruit de mesure

- Backstepping sans action intégrale

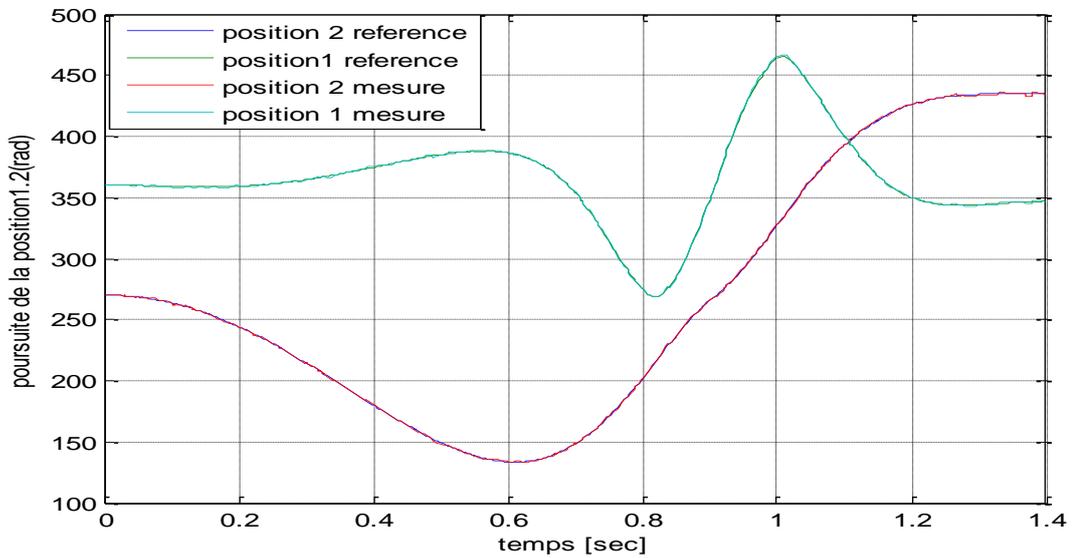


Figure III-2 Poursuite de position 1.2 (Back+bruit de mesure)

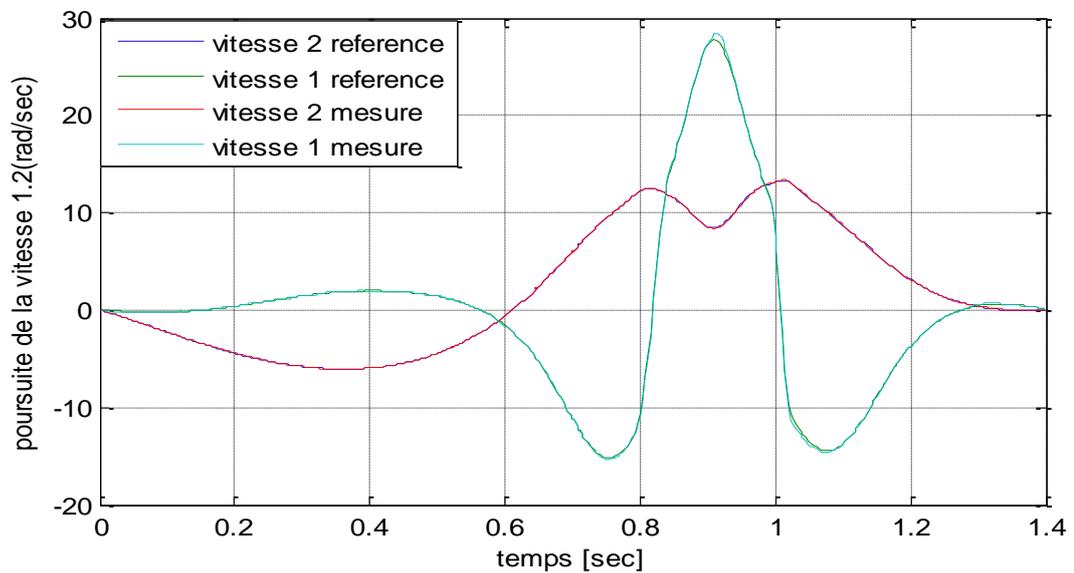


Figure III-3 Poursuite de vitesse 1.2 (Back+bruit de mesure)

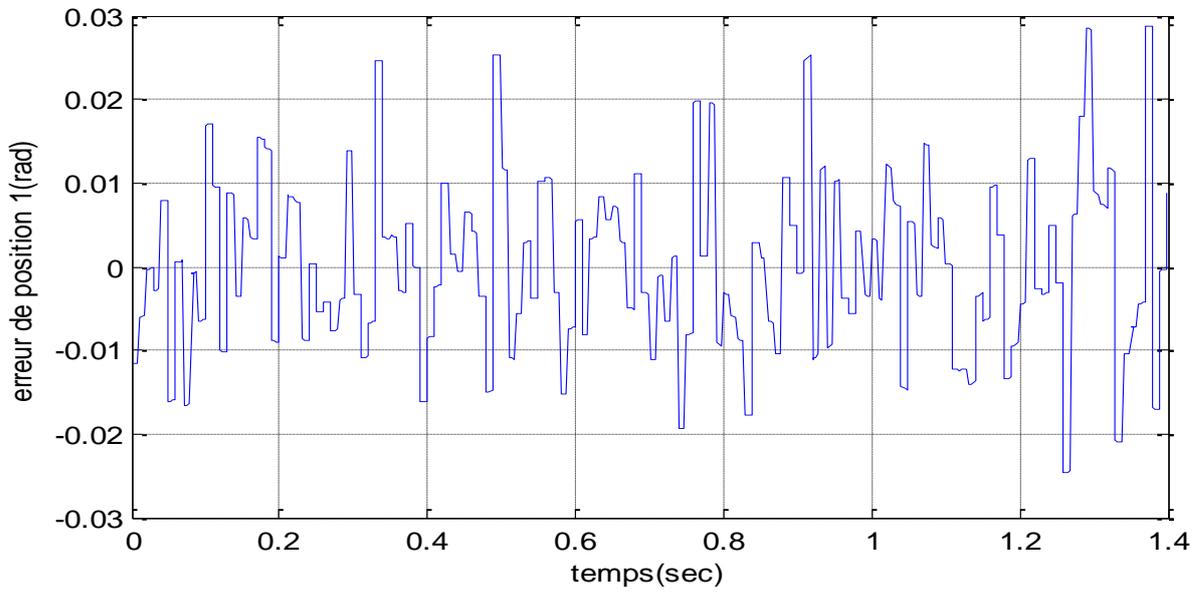


Figure III-4 Erreur de la position angulaire 1 (Back+bruit de mesure)

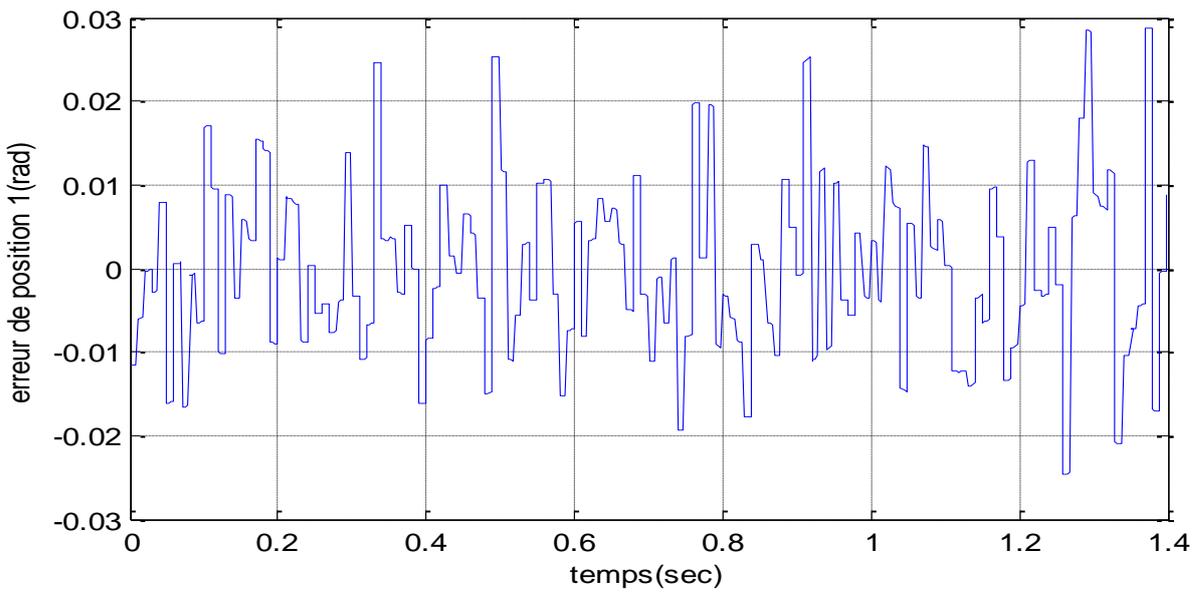


Figure III-5 Erreur de la position angulaire 2 (Back+bruit de mesure)

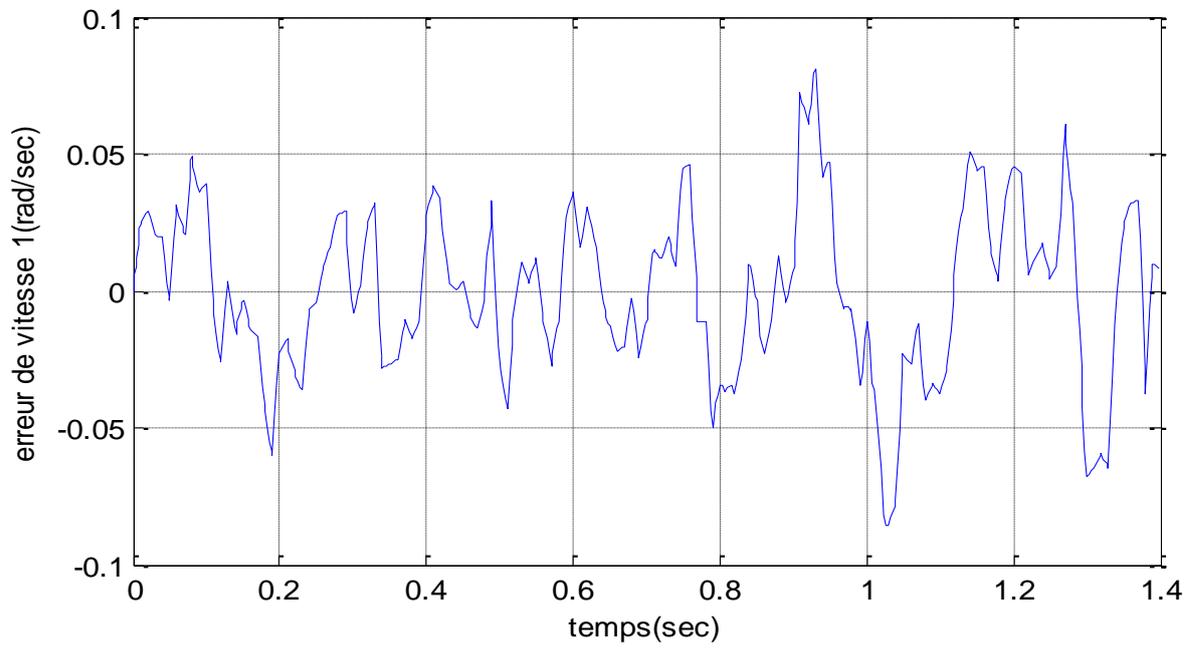


Figure III-6 Erreur de la vitesse angulaire 1(Back+bruit de mesure)

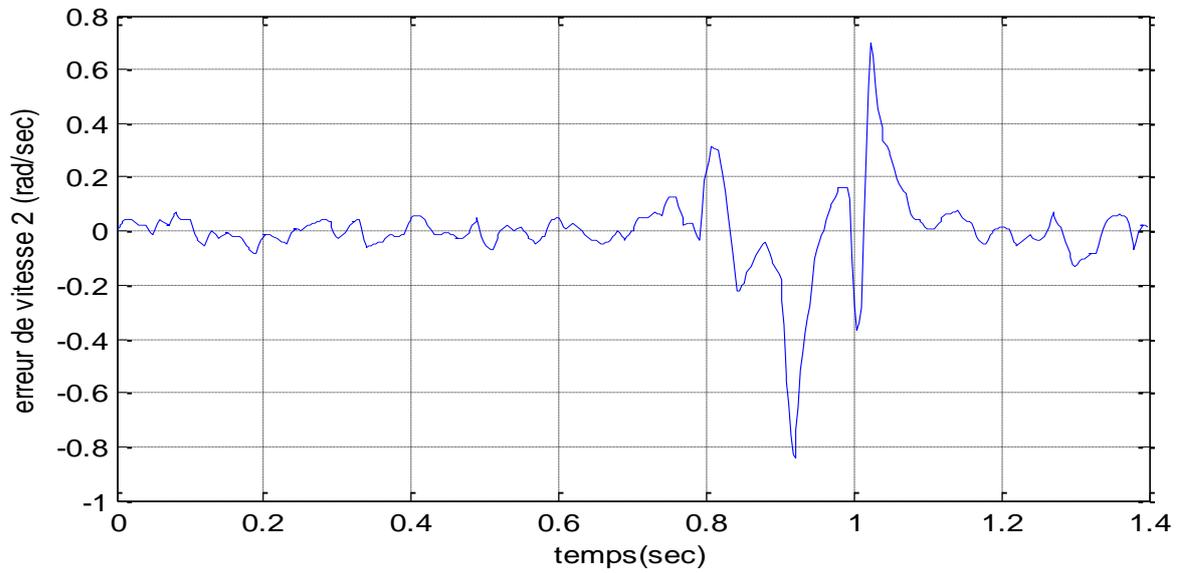


Figure III-7 Erreur de la vitesse angulaire 2(Back+bruit de mesure)

D'après la figure (III-2) on remarque qu'il y a une bonne poursuite des positions angulaires 1 et 2 et ça se voit clairement à partir des figures des erreurs (III-4) et (III-5) qui sont de l'ordre de 10^{-2} . On peut dire donc que la commande backstepping a donné de bons résultats.

A travers les figures (III-3), (III-6), (III-7), illustrant les deux vitesses angulaires ainsi que les erreurs correspondantes, nous relevons la même remarque citée précédemment.

III-4-2 Sensibilité de la commande au bruit de mesure et changement des paramètres du robot

Afin de tester la robustesse de la commande backstepping, on a appliqué, en plus du bruit de mesure la variation des paramètres du 2ème bras en utilisant les valeurs suivantes : $m_2 = 1.02 \text{ Kg}$, $I_2 = 0.10511 \text{ Kg.m}^2$.

Le schéma bloc suivant, illustre l'application de cette commande au robot :

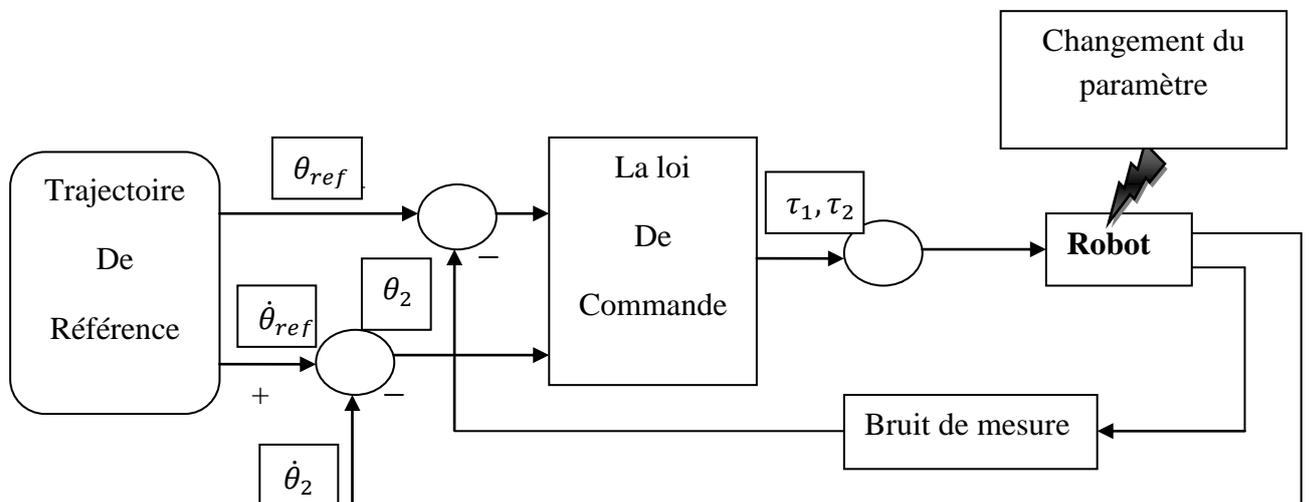


Figure III-8 Schéma bloc de la commande backstepping avec deux perturbations

Les paramètres du régulateur backstepping appliqués dans ce cas sont représentés dans le tableau suivant :

Les paramètres	k_1	k_2	k_3	k_4
La valeur	20	0.2	5	100

Tab III-3 Les paramètres de la commande backstepping avec deux perturbations.

Nous avons testé la robustesse ainsi que la sensibilité de la commande robuste, backstepping, appliquées au robot en présence de deux perturbations . Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation achevés.

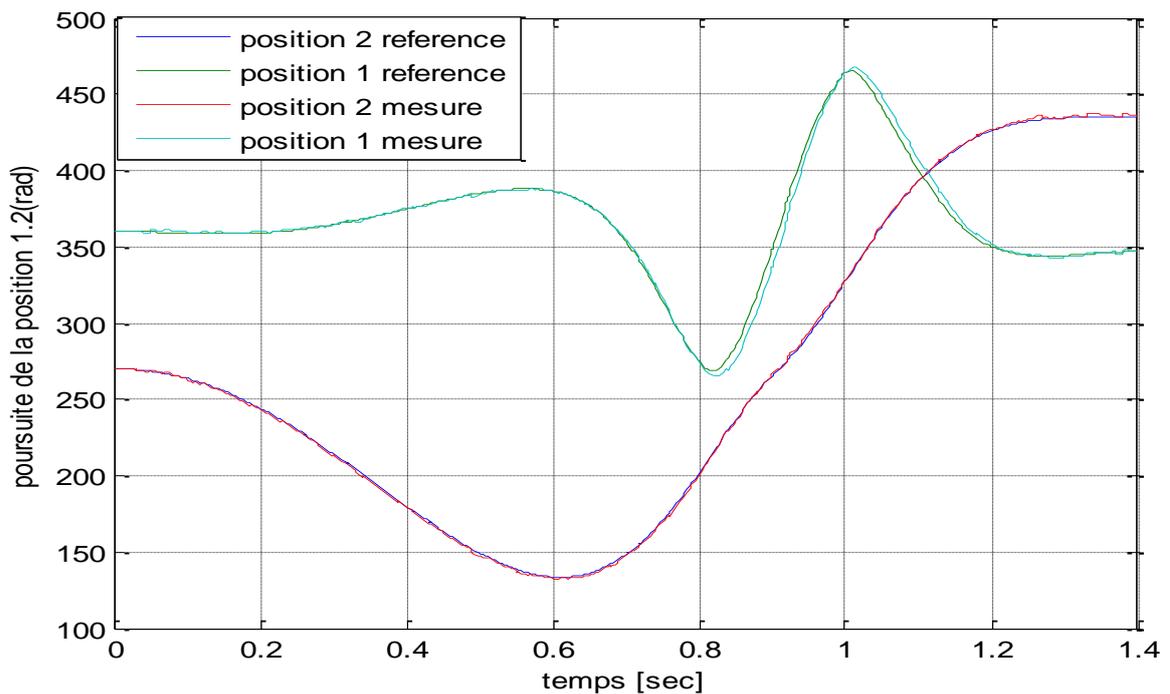


Figure III-9 Poursuite de position 1.2 (Back+bruit de mesure+test de robustesse)

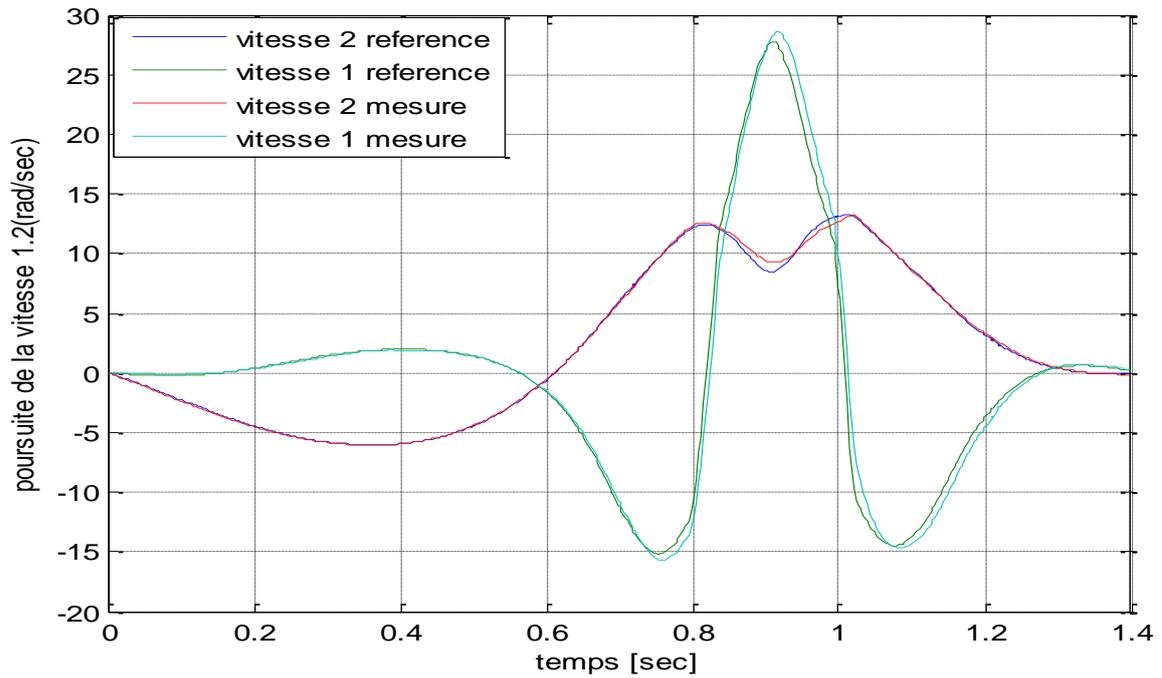


Figure III-10 Poursuite de vitesse 1.2 (Back+bruit de mesure+test de robustesse)

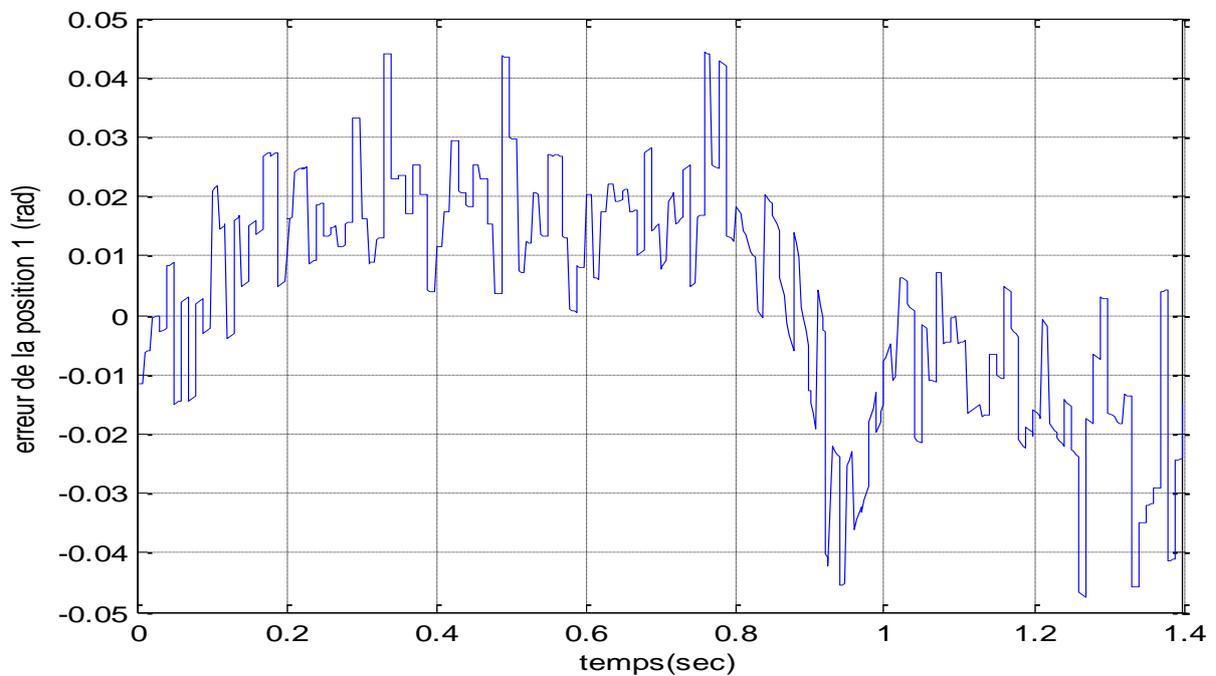


Figure III-11 Erreur de la position angulaire 1 (Back+bruit de mesure+test de robustesse)

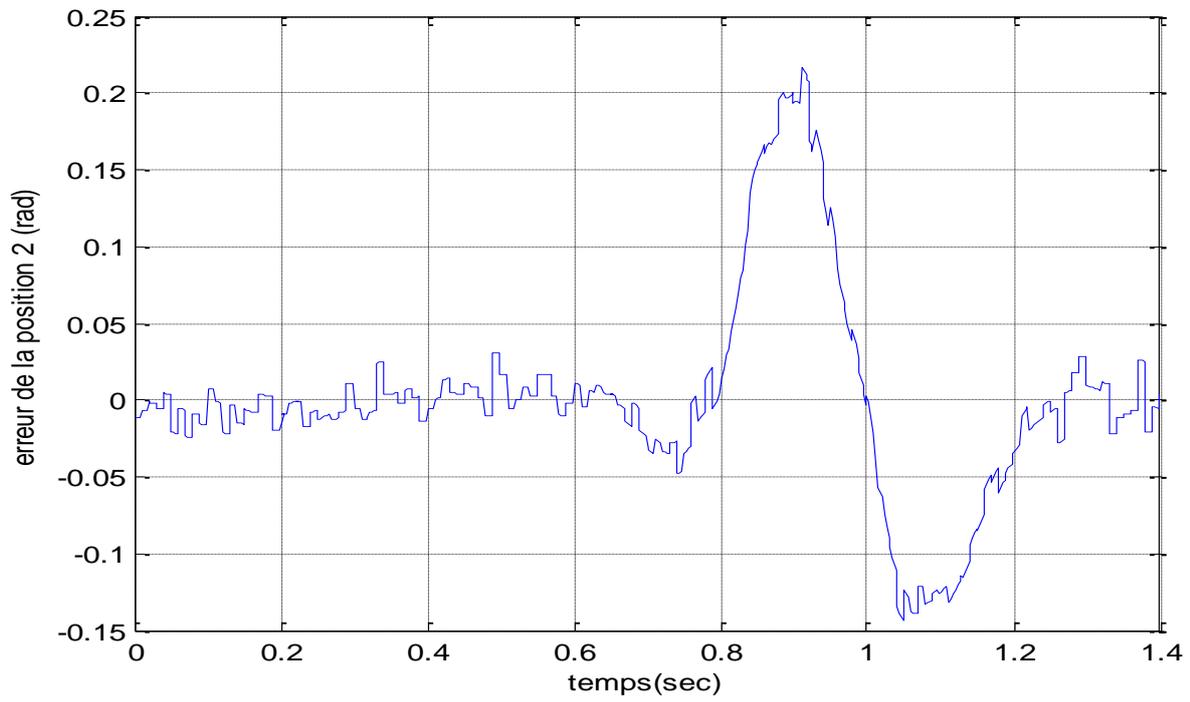


Figure III-12 Erreur de la position angulaire 2(Back+bruit de mesure+test de robustesse)

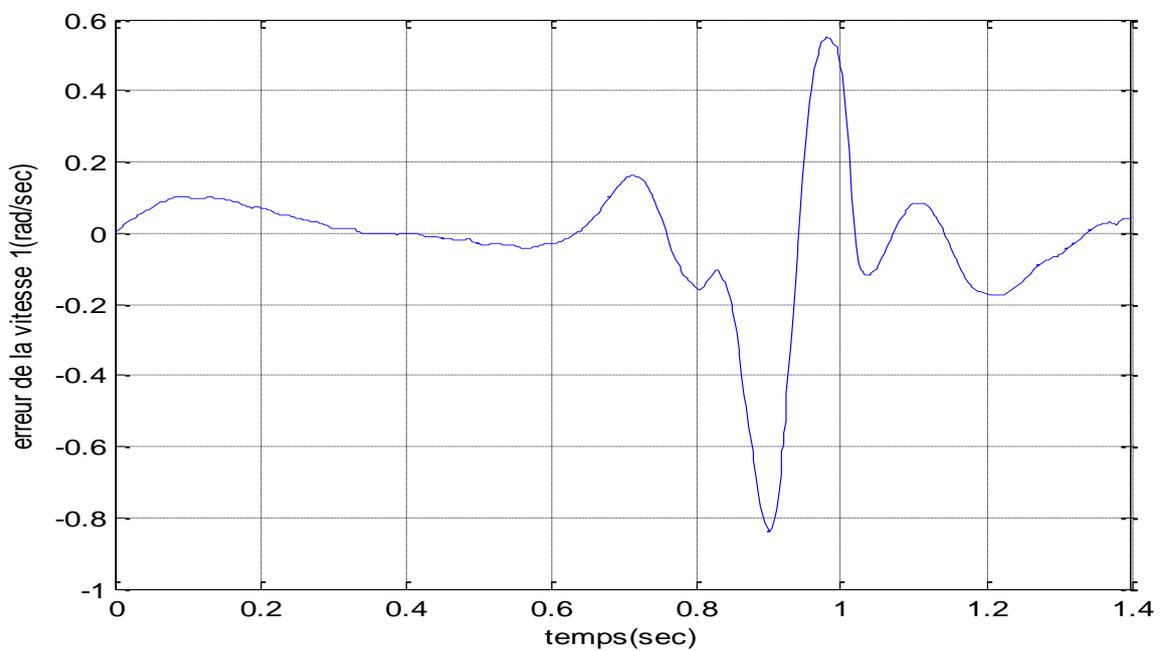


Figure III-13 Erreur de la vitesse angulaire 1(Back+bruit de mesure+test de robustesse)

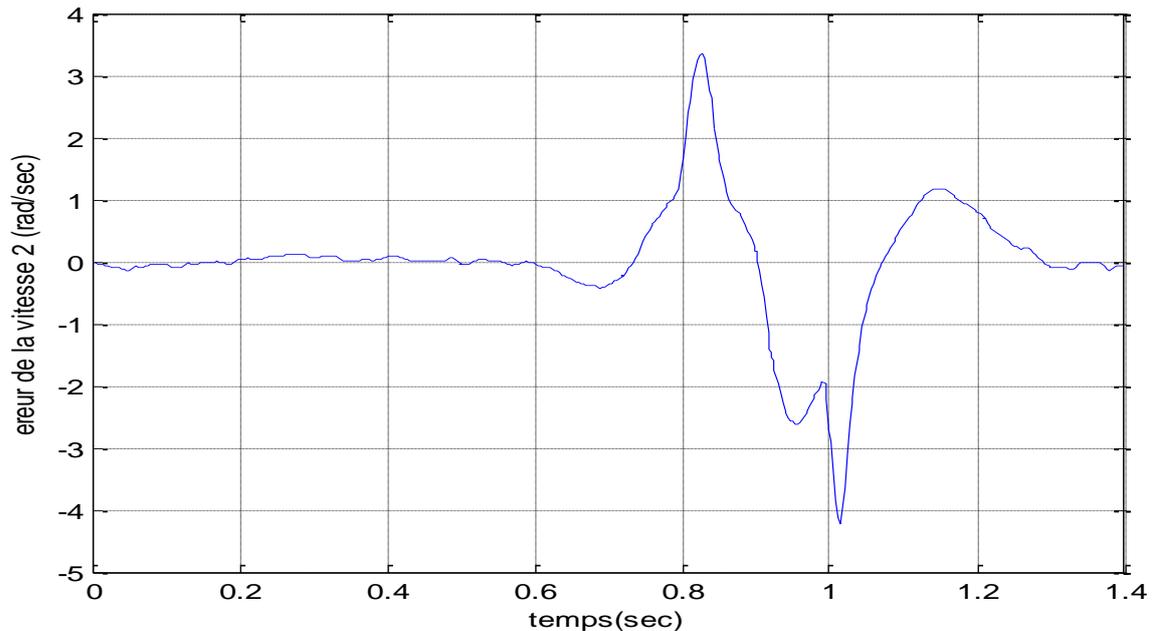


Figure III-14 Erreur de la vitesse angulaire 2 (Back+bruit de mesure+test de robustesse)

Les figures (III-9), (III-11), (III-12) montrent que la poursuite des positions de références pour les deux segments n'a pas été parfaite ainsi que les erreurs correspondantes sont augmentées et cela surtout pour le deuxième segment car nous avons changé ses paramètres. Cette fois ci, on peut dire que la commande appliquée n'a pas été robuste vis-à-vis la variation des paramètres du robot. Pour remédier à ce problème on a introduit l'action intégrale à cette commande afin de minimiser l'erreur de poursuite.

Nous pouvons confirmer ce résultat en examinant les figures (III-10), (III-13), (III-14) qui montrent la poursuite de vitesse des deux bras du robot manipulateur ainsi que les erreurs correspondantes.

- **Backstepping avec action intégrale**

Dans ce cas, nous avons appliqué la commande backstepping avec l'action intégrale au robot à la présence des deux perturbations à savoir le bruit de mesure ainsi que la variation de paramètre du 2ème segment.

Les paramètres à régler du contrôleur sont représentés dans le tableau suivant :

Les paramètres	k_1	k_2	k_3	k_4	λ_1	λ_2
La valeur	10	10	15	100	0.5	0.5

Tab III-4 Les paramètres de la commande backstepping avec l'action intégrale et deux perturbations.

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation obtenus :

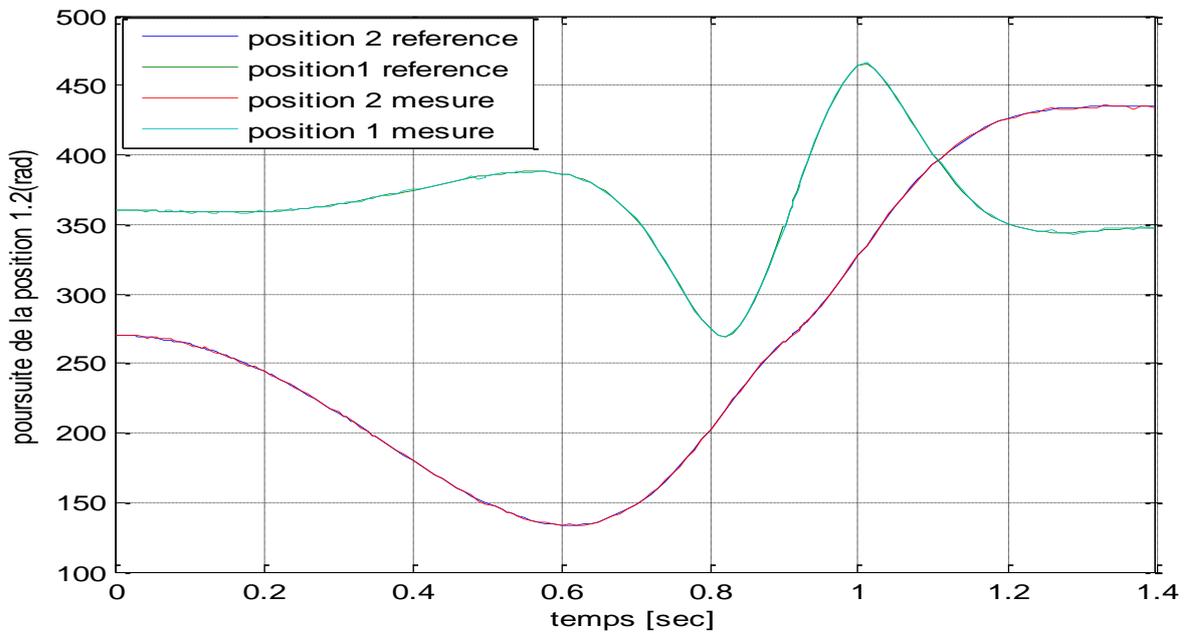


Figure III-15 Poursuite de position 1.2 (Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

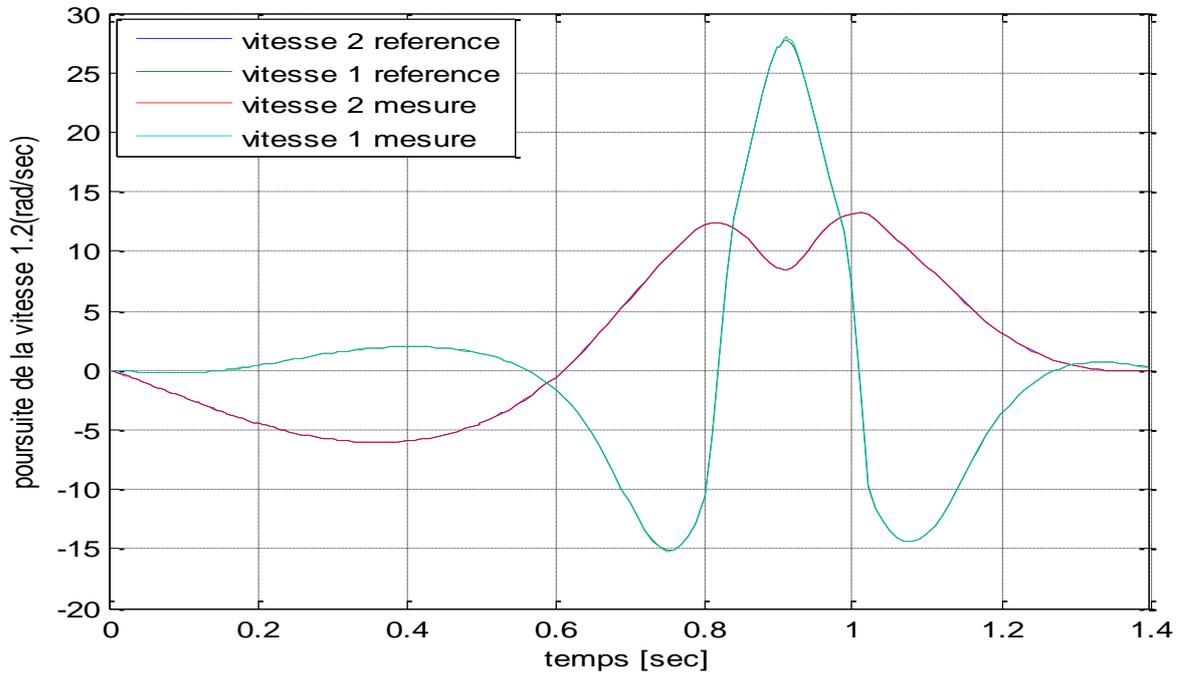


Figure III-16 Poursuite de vitesse 1.2(Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

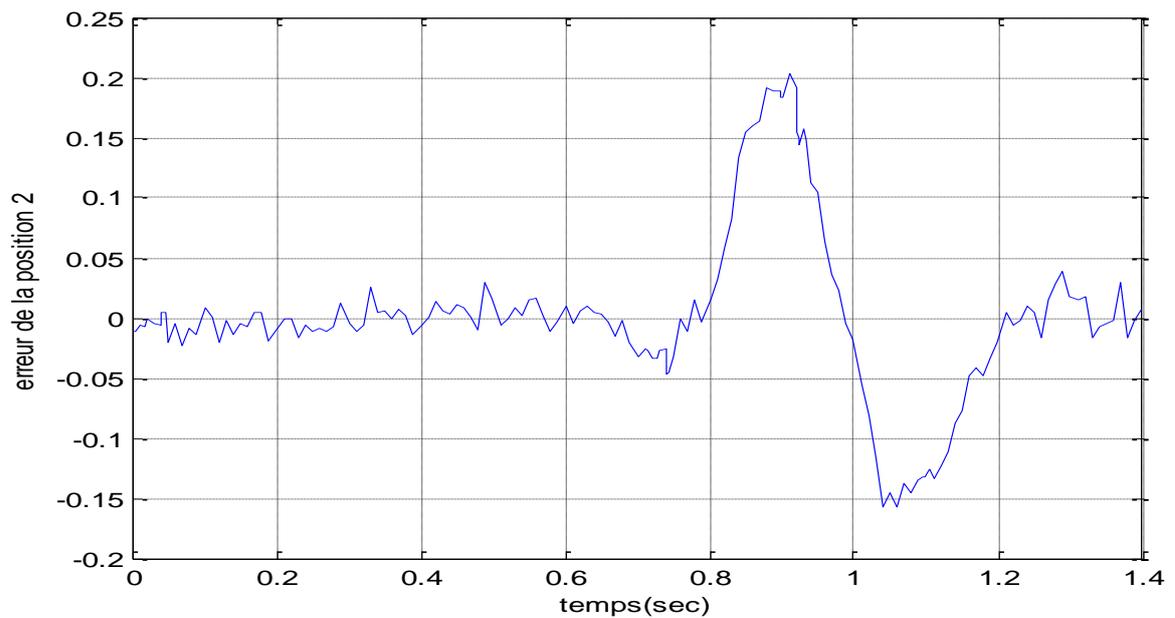


Figure III-17 Erreur de la position angulaire 1(Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

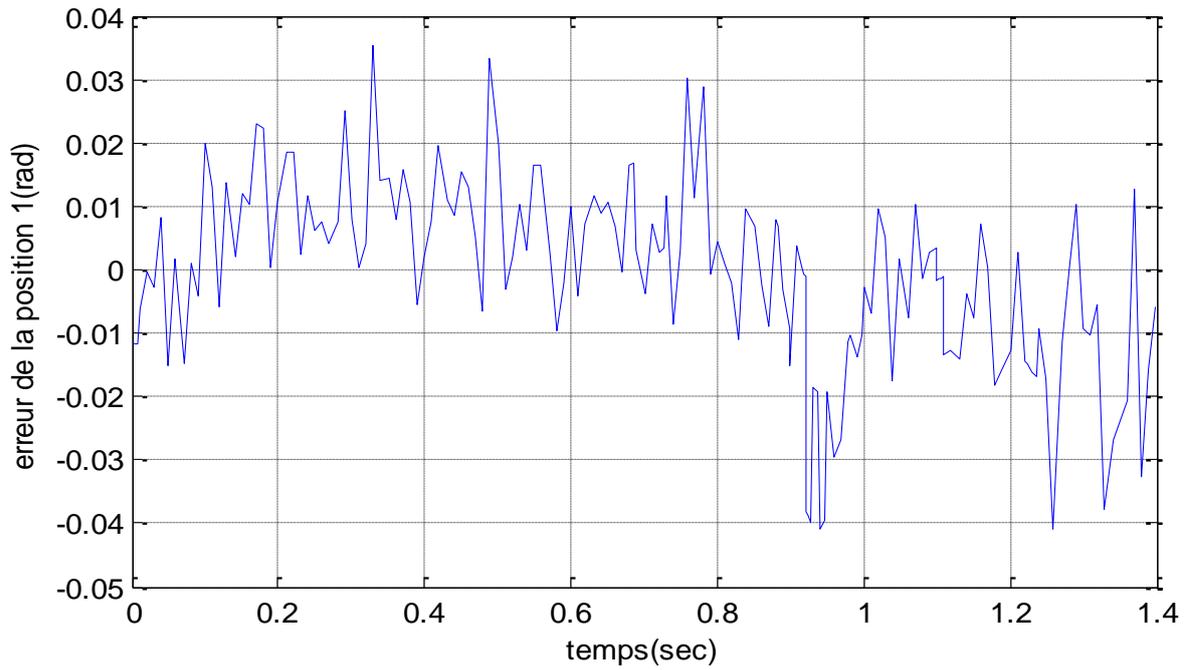


Figure III-18 Erreur de la position angulaire 2(Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

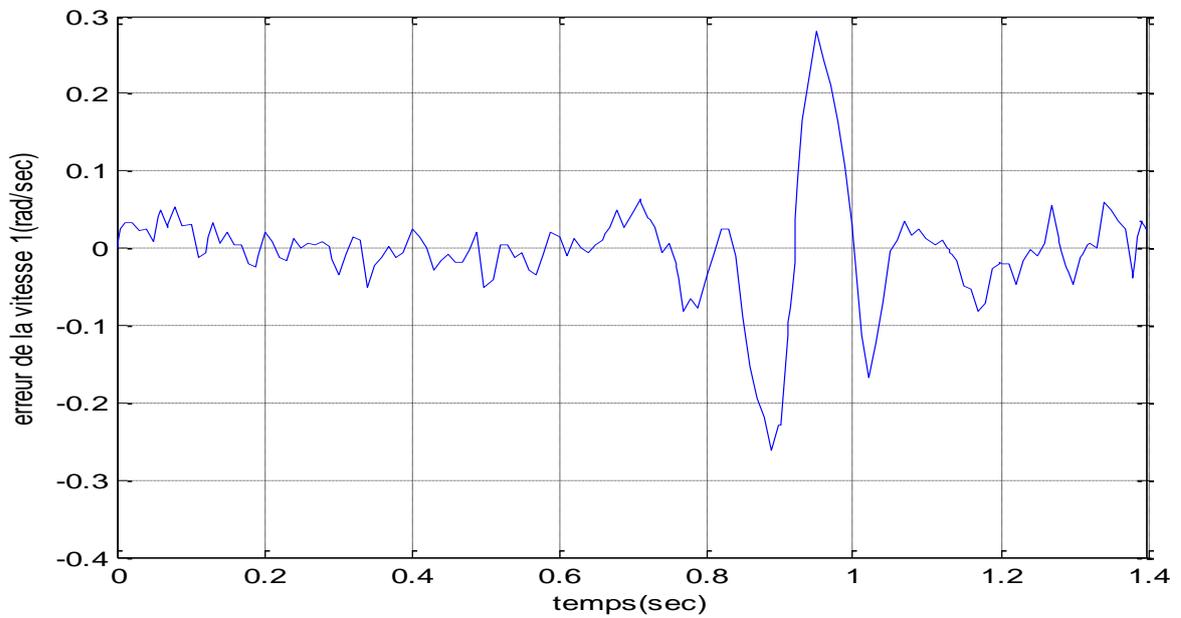


Figure III-19 Erreur de la vitesse angulaire 1(Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

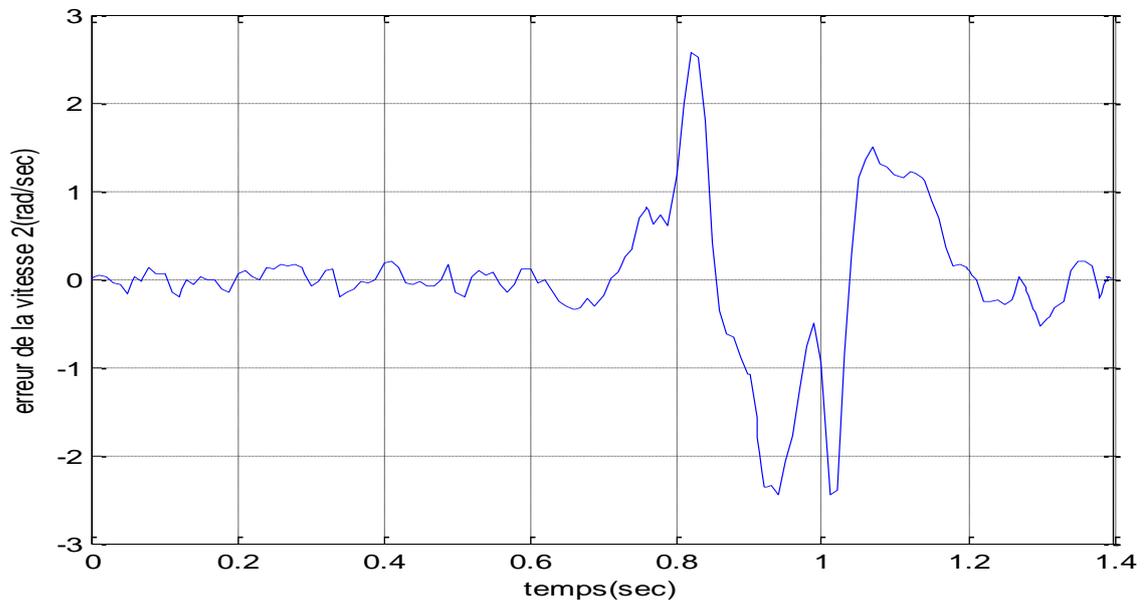


Figure III-20 Erreur de la vitesse angulaire 2(Back intégrale+bruit de mesure+ robustesse)

Les figures, (III- 15, 17, 18) montrent que l'action intégrale a diminué l'erreur statique et qu'il y a une bonne poursuite des positions angulaires mesurées à celles désirées.

A partir de la figure (III-16) représentant les vitesses angulaires ainsi que les figures (III-19), (III-20) représentant les erreurs correspondantes, nous pouvons tirer les mêmes constatations citées précédemment.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la commande backstepping avec et sans l'action intégrale pour le bras manipulateur, en présence de deux perturbations à savoir : le bruit de mesure et la variation des paramètres du 2ème segment du robot.

Les résultats de simulations acquises ont montré que la commande backstepping munie d'une action intégrale a donné de meilleures performances par rapport à la commande backstepping toute seule.

Nous pouvons conclure que l'élément clés des lois de commandes appliquées au robot dans ce mémoire est le bon choix des gains correspondants aux contrôleurs.

Conclusion générale

Notre travail consiste à la modélisation dynamique d'un bras manipulateur à deux degré de liberté afin qu'on puisse lui appliquer une commande robuste qui peut vaincre toutes types de perturbations extérieur ou intérieur.

Notre soucis principal consiste d'une part, à établir un modelé dynamique compatible gouvernant le mouvement du robot manipulateur à 2ddl, et d'autre part, à développer une technique de contrôle robuste, efficace et performante afin de commander ce robot, pour qu'il assure la poursuite de sa trajectoire de référence.

L'obtention du modèle dynamique de mouvement est basée sur des hypothèses qui permettent l'application des lois de la mécanique classique. Cette modélisation a été établit après avoir donnée une représentation descriptive du bras manipulateur correspondant. Le modèle obtenu est non linéaire et fortement couplé.

Afin d'assurer la stabilité et la précision du mouvement du robot, nous avons utilisé le modèle dynamique du robot, sur lequel, nous avons appliqué deux lois de commande robustes en présence des perturbations diverses, à savoir la commande « Backstepping » et la commande « Backstepping avec action intégrale ».

Les résultats de simulation acquis montrent que les commandes utilisées permettent la poursuite du système à sa référence malgré la présence des perturbations tels que le bruit de mesure ainsi que la variation paramétrique du deuxième bras. Néanmoins, l'ajout de l'action intégrale à la commande Backstepping présente une amélioration des performances du robot par rapport aux variations paramétriques.

Perspectives

Si bien que ce travail reste encore inachevé, un certain nombre de point reste à examiner nous pouvons invoquer :

- Application de la commande robuste Backsteppinge adaptative.
- L'application de la commande à travers ce mémoire sur un processus réel en passant par la réalisation pratique du robot.
- L'utilisation de l'intelligence artificielle telle que la logique floue ou bien les algorithmes génétiques pour la détermination des paramètres des commandes utilisées dans ce mémoire.
- Application d'autres lois de commande non linéaires et robustes tel que le mode glissant afin de comparer les performances du contrôleur adopté dans ce mémoire.
- L'utilisation des observateurs robustes.
- La commande en 3D par des caméras.
- La commande du bras à distance via Internet.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson et M. Vidyasagar, "Robot modeling and Control". Wiley, 480 pages, 2006.
- [2] J. J. Craig "Introduction to robotics: Mechanics and Control", , Addison-Wesley series in electrical and computer engineering, control Engineering, Prentice-Hall, Troisième édition, 400 pages, 2004.
- [3] B. Siciliano et O. Khatib, "Handbook of robotics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1600 pages, 2008.
- [4] J.P. Merlet, "Les robots parallèles", Hermes, 1997.
- [5] W. Khalil, E. Dombre, "Modeling, Identification and Control of Robots", Hermes, 480 pages, 2002.
- [6] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, "Robotics: Modelling, Identification and Control", Series Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer, 632 pages, 2010.
- [7] A. Isidori, "Nonlinear Control Systems : An introduction", Springer, Berlin, Vol.72, 1985.
- [8] T. Bajd, M. Mihelj, J. Lenarcic, A. Stanovnik et M. Munih, "Robotics", Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering Series, Springer, 150 pages, 2010.
- [9]] P. Kokotovic, "The Joy of Feedback : Nonlinear and Adaptive". IEEE Control Systems Magazine, Vol. 12, N 3, pp. 7-17, 1992.
- [10] M. Krstic, I. Kanellakopoulos et P.V. Kokotovic, "Nonlinear and Adaptative Control Design". John Wiley Sons, Inc., 1995.
- [11] R. Freeman et P.V. Kokotovich, "Robust Nonlinear Control Design : State-Space and Lyapunov Techniques". 1996.
- [12] M. Krstic, I. Kanellakopoulos et P.V. Kokotovich, "Nonlinear and Adaptive Control Design". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, N 12, pp.1849-1853, 1996 .

[13] R. Sepulchre, M. Jankovic et P.V. Kokotovic, "Constructive Nonlinear Control". Springer-Verlag, 1997.

[14] R. A. Freeman et P.V. Kokotovic, "A New Lyapunov Function for the Backstepping Design of Softer Robust Nonlinear Control Laws". Technical report CCEC, N 92, pp.520, 1992.

[15] K. Draoui, M.A. Benyoucef, "Commande robuste d'un robot hyper dynamique", Master en Automatique. USTO, Oran, Algérie2012.

[16] S. Benmansour, "Génération du mouvement optimal et commande d'un robot manipulateur hyper dynamique", Thèse de Doctorat en automatique, USTO, Oran, Algérie, 2016.