الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des Sciences et de Technologie



Projet de Fin d'Études

Présenté pour l'Obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : Automatique des systèmes

Thème

COMMANDE LINEARISANTE ROBUSTE D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE PUMA

Proposé et dirigé par,

Mr. MEDJEBOURI Ali

Réalisé et présenté par,

Mr. GRIOU Mustapha

Mr. FERKIOUI Houssam

Année Universitaire 2014-2015

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon cher papa qui a su se montrer patiente, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort.

A mes frères Ahmed, Rachid, Mahmoud

Le petit Yasser

A ma famille, grande et petite

A mes chères copines
Ahcen, Souhil,
Hassen, Adel, Lyes,
Aissa, Marouan,
Omar, Sid Ali,
Soumia.

À tous mes amis et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

Houssam

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A mes parents surtout ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon frère Abd Elkader, Djamel, et le petit Imad Eddine et mes sœurs qui étaient toujours à mes côtés et qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager: Jamais de simples mots ne me permettront de vous exprimer mes remerciements.

A mes petits enfants Youcef,

Mohammed Ayoub, Mohammed

Amin et mohammed Abdellah

Asma (Randa)

A ma grande famille

A mes chères copines Hassen et Ahcen, Souhil, Omar, Adel, Lyes, Khaled

A mon cousin Mohammed.

À tous mes amis et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

Merci.

MUSTAPHA

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, la patience, la volonté et la force nécessaires pour achever ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et à exprimer toute ma Gratitude à Mr A. Medjbouri d'avoir accepté de rapporter ma thèse. Merci pour vos conseils votre disponibilité et soutien dans les moments délicats.

je remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certaine de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certains problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier ma petite famille que j'aime énormément et que je remercie chaleureusement du fond du cœur, d'avoir supporté mon absence durant tous ces années et qui m'a soutenu à chaque moment difficile de ma vie.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux que je n'ai pas cités mais que je n'ai pas oubliés pour autant et qui de près comme de loin m'ont aidé, soutenu et encourager aux moments opportuns. A tous, un grand MERCI!

ملخص

الروبوتات مناور PUMA 560 تستخدم على نطاق واسع في العمليات الصناعية. في هذا الصدد سيتم تطبيق الرقابة الخطية المدخلات والمخرجات للسيطرة على موقف نوع من الروبوت مناور PUMA 560 مع ثلاث درجات من الحرية مع الأخذ بعين الاعتبار ديناميات المحركات. النموذج الديناميكي يتكون من نظام المعادلات التفاضلية غير الخطية من الدرجة الثانية. في الصناعة وضعت قوانين مراقبة نماذج خطية من اجل تبسيط خوارزميات تأليفهم. بعض الأحيان اللاخطيات في النظم الحقيقية تمنع هذه التقنيات السيطرة الخطية من تحقيق الأداء المطلوب. تطبيق التقنية الخطية المدخلات والمخرجات والتي تعتبر تقنية خطية المحدد استنادا إلى أدوات الهندسة التفاضلية، تسمح بتحويل الانظمة اللاخطية متعددة المداخل الى سلسلة من أنظمة منفصلة عن طريق تغيير المتغيرات و ردود الفعل اللاخطية. بينما تتطلب هذه التقنية نموذجا دقيقا لنظام التحكم وهذا ليس الطابع القوي الذي يحد من استخدام هذه التقنية في تطبيقات حقيقية. لتحسين متانة هذا الأسلوب نقترح في هذا المشروع إدخال نشاط رفض الاضطرابات محمل من اجل رفض عدم دقة النموذج والاضطرابات الخارجية. هذا المصطلح يقوم بتحميل, تقدير وتعويض في الوقت الحقيقي تأثير اضطرابات أصول حدودية او خارجية.

كلمات مفتاحية

مناور PUMA , تحكم خطي, مراقب ذو حالة واسعة, رد نشط للاضطرابات.

Résumé

Les robots manipulateurs PUMA 560 sont largement utilisés dans les procédés industriels. Dans ce sujet la commande linéarisante entrées-sorties sera appliquée pour la commande de position d'un robot manipulateur de type PUMA 560 à trois degrés de liberté avec la prise en compte de la dynamique des actionneurs. Le modèle dynamique décrivant le comportement du manipulateur est constitué d'un système équations différentielles non linéaires du deuxième ordre fortement couplé. Dans l'industrie, les lois de commande linéaires développées à base des modèles linéaires approchés des manipulateurs sont souvent utilisées en raison de la simplicité de leurs algorithmes de synthèse. Cependant, les non-linéarités dans les systèmes réels empêchent parfois ces techniques de contrôle linéaires d'atteindre les performances requises. L'application de la technique de linéarisation entrées-sorties, qui se présente comme une méthode de linéarisation exacte basée sur les outils de la géométrie

différentielle, permet de transformer le système non linéaire multivariables (plusieurs entrées-plusieurs sorties) en une série de systèmes linéaires découplés, par le moyen d'un changement de variables et d'un retour d'état non linéaire. Cependant la linéarisation entrées sorties nécessite un modèle précis du système à contrôler, et c'est ce caractère non robuste qui limite l'utilisation de cette technique dans les applications réelles, afin d'améliorer la robustesse de cette méthode de commande, nous proposerons dans ce projet l'introduction d'un terme de rejet actif de perturbation charger de rejeter les effets des imprécisions du modèle et des perturbations externes. Ce terme est chargé, estimer et de compenser en temps réel l'effet de ces termes de perturbations d'origines paramétriques ou externes.

Mots clés

Manipulateur, PUMA, Commande linéarisante, Observateur à état étendu, rejet actif de perturbations.

Abstract

The PUMA 560 manipulator robots are widely used in industrial processes. In this regard the input-output linearizing control will be applied for the position control of a robot manipulator type PUMA 560 with three degrees of freedom by taking into account the dynamics of the actuators. The dynamic model describing the behavior of the manipulator consists of a system of nonlinear differential equations of the second order strongly coupled. In industry, the linear control laws developed based linear models approached manipulators are often used because of the simplicity of their synthesis algorithms. However, nonlinearities in real systems sometimes prevent these linear control techniques to achieve the required performance. The application of technical input-output linearization, which presents itself as an exact linearization method based on the tools of differential geometry, transforms the nonlinear multivariable system (multiple input-multiple output) in a series of systems linear decoupled by means of a change of variables and a feedback nonlinear state. However linearization inputs and outputs requires an accurate model of the system to control, and that's

not robust character that limits the use of this technique in real applications, to improve the robustness of this control method we propose in this project introducing an active rejection of disturbance term load to reject the effects of inaccuracies of the model and external disturbances. This term is loaded to estimate and compensate in real time the effect of the terms of parametric disturbances or external origins.

KeyWords

Manipulator, PUMA, linearizing control, extended state observer, active disturbance rejection.

Table de matière

Table de matière

DEDICACE

REMERCIEMENT

RESUME

TABLE DES MATIERES …… I

LISTE DES ABREVIATIONS ……... VI

TABLE DES FIGURES…… VII

TABLE DES TABLEAUX ……..... XI

INTRODUCTION GENERALE ……..…… 1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ROBOTS MANIPULATEURS

I.1. Introduction ……. 4

I.2. Définition et historique ……. 4

I.2.1. Définition…….. 4

I.2.2. Historique ……..... 4

I.3. Différentes catégories de robots …….. 4

I.4. Classification des robots manipulateurs selon l'association française de robotique industrielle (AFRI) …….. 5

I.4.1. Manipulateur manuel …… 5

I.4.2. Manipulateur automatique …… 5

I.4.3. Robots programmables ……. 5

I.5. Structure générale d'un robot manipulateur ……. 6

I.5.1. Vocabulaire d'un manipulateur …… 6

I.5.2. Structure mécanique articulée (SMA) ……. 9

I.5.3. Les actionneurs …….. 10

I.5.3. Les capteurs …….. 11

I.5.4. L'organe terminal …… 12

I.5.4.1. Les effecteurs ……... 12

I.5.4.2. Les pinces ……. 14

I.6. Architecture de robot manipulateur ……. 15

I.7. Les manipulateurs robotiques les plus utilises dans les applications industrielles ... 18

I.8. Les types d'espace relatif de robot ……..... 21

I.9. Caractéristiques d'un robot manipulateur …….. 21

I.9.1. Volume de travail …… 21

I.9.2. Répétabilité ou précision …… 23

I.9.3. les Performances dynamiques …… 23

I.9.4. Charge utile …… 23

I.9.5. Auto adaptabilité à l'environnement …….. 23

I.9.6. Critère relatif à la sécurité ……... 23

I.9.7. Exactitude de trajectoire …….. 24

I.9.8. Répétitivité de trajectoire …… 24

I.9.9. Reproductibilité de pose …… 24

I.9.10. Critère d'ordre économique ……... 24

I.10. Utilisation des robots …… 25

I.10.1. Tâches simples …… 25

I.10.2. Tâches complexes ……..... 25

I.11. Avenir de la robotique ……..……... 25

I.12. Conclusion ……. 26

CHAPITRE II : MODALISATION DU ROBOT MANIPULATEUR PUMA 560

II.1. Introduction ……... 27

II.2. Configuration et situation d'un bras manipulateur ……. 27

II.3. Notions de base ……. 28

II.3.1. Coordonnées homogènes ……. 28

II.3.1.1. Représentation d'un point …….. 28

II.3.1.2. Représentation d'une direction …….. 29

II.3.2. Transformation homogènes …….. 29

II.3.2.1. Transformation des repères …… 29

II.3.2.2. Transformation des vecteurs ……. 30

II.3.2.3. Matrice de transformation de translation pure ……..... 31

II.3.2.4. Matrice de transformation de rotation autour des axes principaux ……. 31

II.2.2.5. Propriétés des matrices de transformation homogène ……... 33

II.3.3. Paramètres de Denavit et Hartenberg …… 35

II.4. Modèle géométrique …….. 37

II.4.1. Construction des matrices de passage …….. 37

II.4.2. Présentation du robot PUMA 560 …… 39

II.5. Statique des robots …… 42

II.5.1. Le modèle géométrique …….. 42

II.5.1.1. Modèle géométrique direct …… 42

II.5.1.2. Modèle géométrique inverse ...……. 45

II.5.2. Le modèle cinématique…… 47

II.5.2.1.Modèle cinématique direct …… 47

II.5.2.2. Modèle cinématique inverse …… 48

II.6. Modélisation dynamique de la structure mécanique articulée ……. 49

II.6.1. le modèle dynamique du robot manipulateur PUMA 560 à trois ddl …….. 50

II.6.2. Modélisation des actionneurs …….. 53

II.6.3. Mise du modèle sous forme d'une représentation d'état ……. 54

II.7. Conclusion ……..... 57

CHAPITRE III : COMMANDE DE BRAS MANIPULATEUR DE TYPE PUMA 560

III.1. Introduction……. 58

III.2. Principe de la technique de linéarisation au sens des entrées-sorties…….. 58

III.2.1. Dérivée de Lie…….. 59

III.2.2. Technique de la commande non linéaire……. 60

III.2.3. Conception du nouveau vecteur de commande v……... 62

III.3. Commande non linéaire du bras manipulateur …… 63

III.3.1. Choix des sorties ……... 63

III.3.3. Degré relatif ……... 63

III.3.4. Transformation difféomorphisme …….. 64

III.3.5. Loi de commande non linéaire ……... 65

III.3.6. Elaboration de la loi de commande externe ……... 66

III.4. Introduction des effets des perturbations et des incertitudes paramétriques ….. 67

III.5. Robustification de la loi de commande linéarisante avec un terme a rejet actif de perturbation(ADRC) …… 68

III.6. Description de la trajectoire désirée dans l'espace opérationnel …… 72

III.7. Résultats des simulations numériques ……73

III.8. Conclusion …… 84

CONCLUSION GENERALE……..... 85

ANNEXE …… 87

BIBLIOGRAPHE

Liste des abréviations

SMA : Structure Mécanique Articulée

P : Liaison Prismatique

R : Liaison Rotoïde

T : Translation

OT : Organe Terminal

DDL : Degrés De Libertés

DDT : Degrés De libertés d'une Tâche

PUMA : (Programmable Universel Machine de l'Assemblée, ou Universel Programmable Manipulation Arm)

MCC : Moteur à Courant Continu

ISO : Organisation International de Normalisation

MG : Modèle géométrique

MGD : Model Géométrique Direct

MGI : Model Géométrique Inverse

D-H : Denavit-Hartenberg

S ($\boldsymbol{\theta}$i) : Sin ($\boldsymbol{\theta}$**i**)

C ($\boldsymbol{\theta}$i) **:** Cos ($\boldsymbol{\theta}$**i**)

R.U.R : Rossums Universel Robots

Trans : Transformation ou Translation

MC : Modèle Cinématique

MCD : Modèle Cinématique Direct

MCI : Modèle Cinématique Inverse

ADRC : Active Disturbance Rejection Control

ESO : Extended State Observer

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ROBOTS MANIPULATEURS

Figure I.1 : constituants d'un bras manipulateurs ……..…… 6

Figure I.2 : Articulation rotoïde (pivot) …….. 7

Figure I.3 : Structure ouverte simple …….. 7

Figure I.4 : Structure de robot à poignet de type rotule (robots Stäubli RX-90) …… 7

Figure I.5 : Structure générale d'un robot manipulateur ……. 8

Figure I.6 : Structure ouverte simple ……... 9

Figure I.7 : Structure arborescente……... 9

Figure I.8 : Structure fermée simple ……..……. 9

Figure I.9 : Structure fermée ……... 9

Figure I.10 : Structure Parallèle …… 10

Figure I.11 : Contacteur …… 11

Figure I.12 : Capteur optique …… 11

Figure I.13 : Mode de préhension ……. 13

Figure I.14 : Outil de soudure et préhenseur ……. 13

Figure I.15 : Nomenclature d'une pince …….. 14

Figure I.16 : Type de pinces ……. 14

Figure I.17 : Robot cartésien …… 16

Figure I.18 : Robot cylindrique …… 16

Figure I.19 : Robot sphérique ……... 16

Figure I.20 : Robot SCARA ……. 18

Figure I.21 : Robot Delta …….. 19

Figure I.22 : Robot PUMA ……... 19

Figure I.23 : Zone de travail d'un robot …… 22

Figure I.24 : L'ordinateur de contrôle et la télécommande ……... 22

CHAPITRE II : MODALISATION DU ROBOT MANIPULATEUR PUMA 560

Figure II.1 : Bras manipulateur ……. 27

Figure II.2 : Représentation d'un point ……. 28

Figure II.3 : transformation des repères …… 29

Figure II.4 : transformation d'un vecteur ……. 30

Figure II.5 : transformation de translation pure ……... 31

Figure II.6 : transformation de rotation pure autour de l'axe x ……..... 32

Figure II.7 : composition des transformations : multiplication à droite ……... 35

Figure II.8 : composition des transformations : multiplication à gauche ……. 35

Figure II.9 : Systèmes de coordonnées et les paramètres de Denavit et Hartenberg .37

Figure II.10 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple..38

Figure II.11 : Vue générale du Robot PUMA 560 …… 39

Figure II.12 : Manipulateur de bras anthropomorphe et poignet rotule …… 40

Figure II.13 : Géométrie du robot PUMA 560 ……. 40

Figure. II.14 : SMA paramétrée …… 43

Figure II.15 : représentation de l'espace de travail dans le MG ……... 47

Figure II.16 : Modèle cinématique direct ……. 48

Figure II.17 : Modèle cinématique inverse …….. 48

Figure II.18 : PUMA 560 robot manipulateur ……. 51

Figure II.19 : Schéma bloc du robot manipulateur des l'espace opérationnel ……. 55

CHAPITRE III : COMMANDE DE BRAS MANIPULATEUR DE TYPE PUMA 560

Figure. III.1 : Principe de la Commande non linéaire …….. 62

Figure. III.2 : Système linéarisé découplé …… 65

Figure III.3 : Schéma global de la commande linéarisante robuste par l'ajout d'un terme ……... 71

Figure III.4 : Trajectoire conique ……. 72

Figure.III.5 : Schéma bloc sous Matlab/Simulink de la loi de commande du robot manipulateur PUMA 560 dans l'espace opérationnel …… 74

Figure III.6 : Résultats de simulation dans l'espace opérationnel ……..... 75

a) Positions x, y, z de l'organe terminal

b) erreurs de poursuite

Figure III.7 : Résultats de simulation dans l'espace articulaire …… 76

a) Variables articulaires q1, q2, q3 des trois articulations du manipulateur.

b) Erreurs de poursuite.

Figure III.8 : représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace Tridimensionnel ……..... 77

Figure III.9 : Résultats de simulation dans l'espace opérationnel …… 78

a) Positions x, y, z de l'organe terminal

b) erreurs de poursuite

Figure III.10 : Résultats de simulation dans l'espace articulaire ……. 79

a) Variables articulaires q1, q2, q3 des trois articulations du manipulateur

b) Erreurs de poursuite

Figure III.11 : représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace Tridimensionnel ……... 80

Figure III.12 : Résultats de simulation dans l'espace opérationnel ……. 81

a) Positions x, y, z de l'organe terminal

b) erreurs de poursuite

Figure III.13 : Résultats de simulation dans l'espace articulaire ……. 82

a) Variables articulaires q1, q2, q3 des trois articulations du manipulateur.

b) Erreurs de poursuite.

Figure III.14 : Représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace tridimensionnel ……..……..... 83

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Classification des robots manipulateurs ……. 17

Tableau I.2 : Tableau de l'historique de la robotique de manipulation établi a partir du rapport IFR (IFR, 2012) …….. 20

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Paramètres géométriques du robot PUMA 560 (paramètres de D-H modifiés) ……. 41

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le développement actuel de robots manipulateurs dédiés à l'interaction avec l'homme permet d'envisager des scénarios d'assistance pour lesquels l'homme et le robot partagent un même espace de travail, aussi bien dans le contexte industriel de production que dans les domaines d'aide à la personne. Les flexibilités des structures mécaniques, innovantes et légères, conçues à cet effet, peuvent constituer une source de limitations dynamiques pour la commande en position de tels robots, tout comme des robots industriels sous charge importante.

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un organe terminal (l'outil ou l'effecteur) qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides appelés segments reliés entre eux, généralement les uns à la suite des autres où chaque solide est mobile par rapport au précédent au moyen de liaisons appelées articulations. Cette mobilité s'exprime en terme de degrés de liberté (d.d.l) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide S1 par rapport au solide qui lui est directement relié S2. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série soit fermées.

L'architecture mécanique des robots sériels est inspirée du bras humain. Ils sont constitués d'une chaîne cinématique ouverte, son mécanisme est donc composé de segments séparés par des articulations à un seul degré de liberté en rotation ou en translation.

Pour qu'un robot manipulateur puisse être exploité dans des applications industrielles, il doit être doté d'un système de commande dont les principaux rôles est de générer les trajectoires désirées que l'organe terminale doit suivre afin de réaliser une tache bien définie dans l'espace opérationnel; et de garantir le suivi de ces trajectoires de référence tout en respectant les performances fixées lors de la conception du système de commande et en assurant la stabilité et la robustesse du système commandé.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études consiste à développer des algorithmes permettant la modélisation et le contrôle du positionnement de l'organe terminal d'un robot manipulateur à chaine cinématique ouverte de type PUMA 560 à 3 liaisons rotoïdes [22].

Pour concevoir toute loi de commander, il est toujours nécessaire, de disposer de modèles du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles. Ils dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée : il en découle des modèles géométriques, cinématiques et dynamiques à partir desquels peuvent être engendrés les mouvements du robot, ou bien des modèles statiques qui décrivent les interactions du mécanisme avec son environnement.

Dans ce projet de fin d'études, l'objectif est le développement d'un algorithme de commande non linéaire robuste pour le contrôle de position d'un bras manipulateur de type PUMA 560. La conception de la loi de commande proposée sera réalisée en deux étapes ; d'abord linéarisation entrée-sortie du modèle nominal au moyen d'un retour d'état non linéaire (feedback linearization control method), cette loi de commande repose sur les outils mathématiques de la géométrie différentielle, qui permet par une transformation difféomorphique et un retour d'état non linéaire de découpler et de linéariser le modèle mis sous forme canonique. Une fois le modèle du système est linéarisé et découplé, le suivi des trajectoires de référence sera réalisé selon le principe de l'imposition des pôles désirés en boucle fermée [21-24]. Cette technique présente l'avantage de pouvoir commander séparément chaque articulation tout en respectant le couplage et les non linéarités du modèle, mais elle présente l'inconvénient d'être très sensible au effets des perturbation et des incertitudes du modèle du fait qu'elle doit reposer sur un modèle mathématique précis du système considéré.

Afin de surmonter cet inconvénient, nous proposerons l'amélioration de la robustesse de cette technique de commande, pour atteindre ce but nous allons introduire une deuxième phase de conception, ou nous allons ajouter un terme supplémentaire dans la loi de commande globale chargé de rejeter de façon active les effets des perturbations d'origines externes ou internes (variation des paramètres et imprécision du modèle).

La commande à rejet actif de perturbation connue sous l'abréviation en anglais ADRC (Active Disturbance Rejection Control) a été d'abord proposé par J. Han dans les années 1990s et encore simplifié et explicité par Z. Gao dans. L'essence de l'ADRC est que la dynamique interne du système ainsi que les perturbations d'origines internes ou externes peuvent être estimé et compensé en temps réel. En raison de sa robustesse et de fort rejet de perturbation, ADRC a été appliquée avec succès dans de nombreux domaines [25-31].

Le présent mémoire est organisé comme suit:

Le premier chapitre sera consacré pour la présentation des notions générales de robotique : les définitions de base, critères de classification, et les caractéristiques des manipulateurs ; puis nous donnerons un aperçu sur l'architecture sur la quelle notre étude sera portée.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéressera à la modélisation dynamique du robot manipulateur PUMA considéré dans l'espace opérationnel. Pour atteindre cet objectif, on va d'abord présenter la démarche de la modélisation géométrique qui permet d'établir la relation entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel, ensuite une modélisation dynamique qui permet de définir la relation entre les couples, les accélérations et les vitesses des articulations sera développée. Enfin, le modèle dynamique du robot manipulateur dans l'espace opérationnel est obtenu par l'association du modèle dynamique dans l'espace articulaire.

La commande linéarisante robuste proposée fera l'objectif du troisième chapitre. Où après avoir présenté les bases théoriques de cette loi de commande, l'application pour le cas du système considéré sera détaillée.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle seront présentées les finalités de notre travail, ainsi que les perspectives que nous suggérons pour les travaux à venir tout en énumérant les difficultés rencontrées.

Chapitre I : Généralité sur la robotique

I.1. INTRODUCTION

Dans ce premier chapitre nous commençons par quelques définitions de base pour faciliter la lecture de mémoire. Ensuite nous présentons la classification des robots ainsi que la Structure générale d'un robot manipulateur et en terminera ce chapitre par la présentation des différentes caractéristiques qu'on trouve dans la littérature.

I.2. DEFINITION ET HISTORIQUE

I.2.1. Définition

- Étymologie : robot provient du tchèque "robota" qui signifie corvée, travail obligatoire [8].

L'Organisation Internationale de Normalisation définit le robot comme étant un manipulateur à plusieurs degrés de liberté, à commande automatique, reprogrammable, multi applications, mobile ou non, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle [10].

I.2.2. Historique

– Origine des termes :

- "Robot" a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce R.U.R. : Rossums Universel Robots.
- Le terme robotique a été employé pour la première fois par Asimov en 1941**.**

– Après :

- 1947 : premier manipulateur électrique télé opéré
- 1954 : premier robot programmable
- 1961 : apparition d'un robot sur une chaîne de montage de General Motors, premier robot avec contrôle en effort.
- 1963 : utilisation de la vision pour commander un robot
- 1973 : premier robot mobile à roues [8].

I.3. DIFFERENTES CATEGORIES DE ROBOTS

Ils existent plusieurs catégories, on peut citer les robots mobiles à roues, robots sous-marins, robots volants, robots humanoïdes et robots manipulateurs … [8].

I.4. CLASSIFICATION DES ROBOTS MANIPULATEURS SELON L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE ROBOTIQUE INDUSTRIELLE (AFRI)

Tous les équipements de la présente classification doivent être adaptables à de multiples applications et comporter un moyen de préhension ou un outil pour effectuer des tâches à caractère industriel, y compris le contrôle.

I.4.1. Manipulateur manuel

Engin de manipulation motorisé, commandé par l'homme ayant au moins quatre de grés de liberté, parmi ces engins nous avons :

- **Manipulateur d'assistance musculaire :** La commande se fait par l'action directe sur la charge ou dans son voisinage, par exemple une girafe de déplacement de charge.
- **Télémanipulateurs :** La commande se fait à distance à l'aide de le vires ou de boutons, tel que : manipulation en ambiance dangereuse, forge, industrie nucléaire, milieu subaquatique (sous-marine).

I.4.2. Manipulateur automatique

Engin de manipulateur à deux axes et plus, non asservi, à cycle automatique, tel que :

- **Manipulateur automatique à séquence fixe :** Réglé mécaniquement par butée, cames et portant un organe terminal, pince, pistolet de projection à titre d'exemple les robots de peinture, chargement ou déchargement de presse et chargeur d'outil.
- **Manipulateur automatique à séquence variable :** Programmable par l'utilisation à l'aide de matrice de diodes, automate programmable, microprocesseur et où chaque axe est réglable mécaniquement par butée ou came tel que : chargement–déchargement des machines outil et l'assemblage.

I.4.3. Robots programmables

- **Manipulateur automatique de trois axes et plus :** dont au moins deux axes sont programmables par apprentissage ou par langage symbolique.

- Manipulateur automatique comportant moins de cinq axes programmables.

- Manipulateur automatique comportant cinq axes et plus programmables.

A titre d'exemple : Robot vertical, horizontal, portique et puma.

Enfin nous avons les robots dit « intelligent » qui sont des : Manipulateurs automatiques programmables capables d'analyser les modifications de son environnement et de réagir en conséquence, a l'exécutai des modifications triviales données par les capteurs. Par exemples : Manipulateur avec reconnaissance de forme, assemblage avec contrôle d'effort, soudage avec suivi de joint [7].

I.5. STRUCTURE GENERALE D'UN ROBOT MANIPULATEUR

Un robot manipulateur est l'ensemble formé par la figure. I.4 :

1. Actionneur = moteur.
2. Axe = articulation.
3. Corps = segment.
4. Organe terminal.
5. Effecteur = outil.
6. Base.

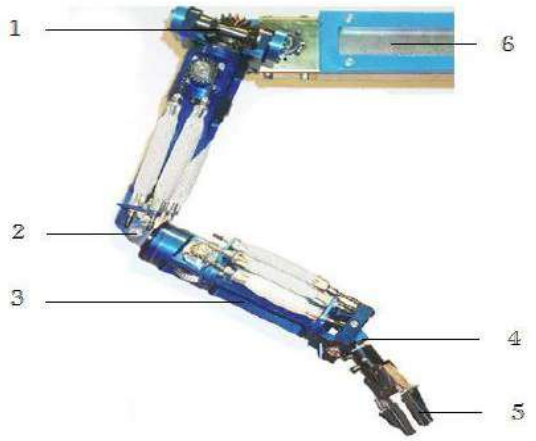


Figure I.1 : constituants d'un bras manipulateurs [1].

I.5.1. Vocabulaire 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 à pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tache (la situation d'un corps peut être

définie comme la position et l'orientation d'un repère attaché à ce corps par rapport à un repère de référence). Il est constitué de :

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

- Articulation : Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que : $0 \leq m \leq 6$

Lorsque m = 1, ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique [2].

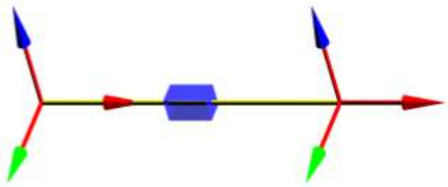


Figure I.4 Articulation prismatique (glissière).

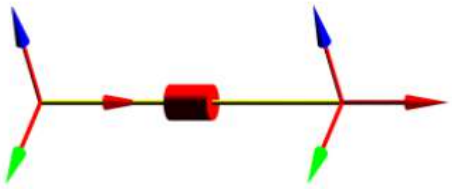


Figure I.5 Articulation rotoïde (pivot) [1].

- Le poignet : il est destiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot.

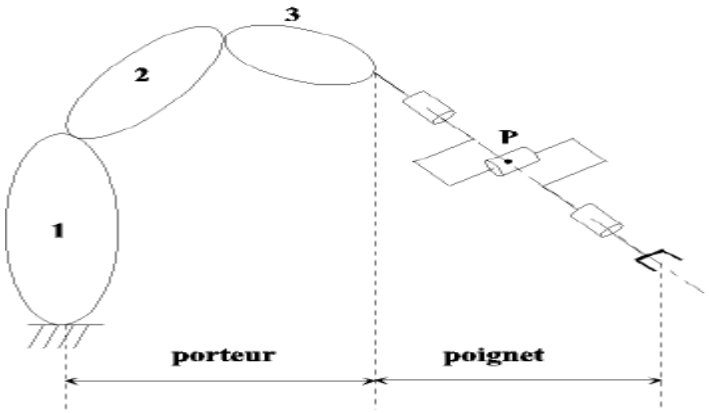


Figure I.4: Structure de robot à poignet de type rotule (robots Stäubli RX-90) [5].

Une structure mécanique qui supporte l'organe terminal à situer :

- Des actionneurs qui servent à agir sur la structure mécanique ;
- Les capteurs divers nécessaires à la commande ;
- Le système de commande qui pilote les actionneurs du robot ;
- Un système décisionnel qui assure la fonction de raisonnement et élabore le mouvement du robot ;
- Un système de communication qui gère les messages transmis entre le système décisionnel et l'opérateur.

La figure I.3 illustre la composition de la structure générale d'un robot manipulateur.

Dans notre travail, on s'intéressera à la structure mécanique du robot (partie Opérationnelle).

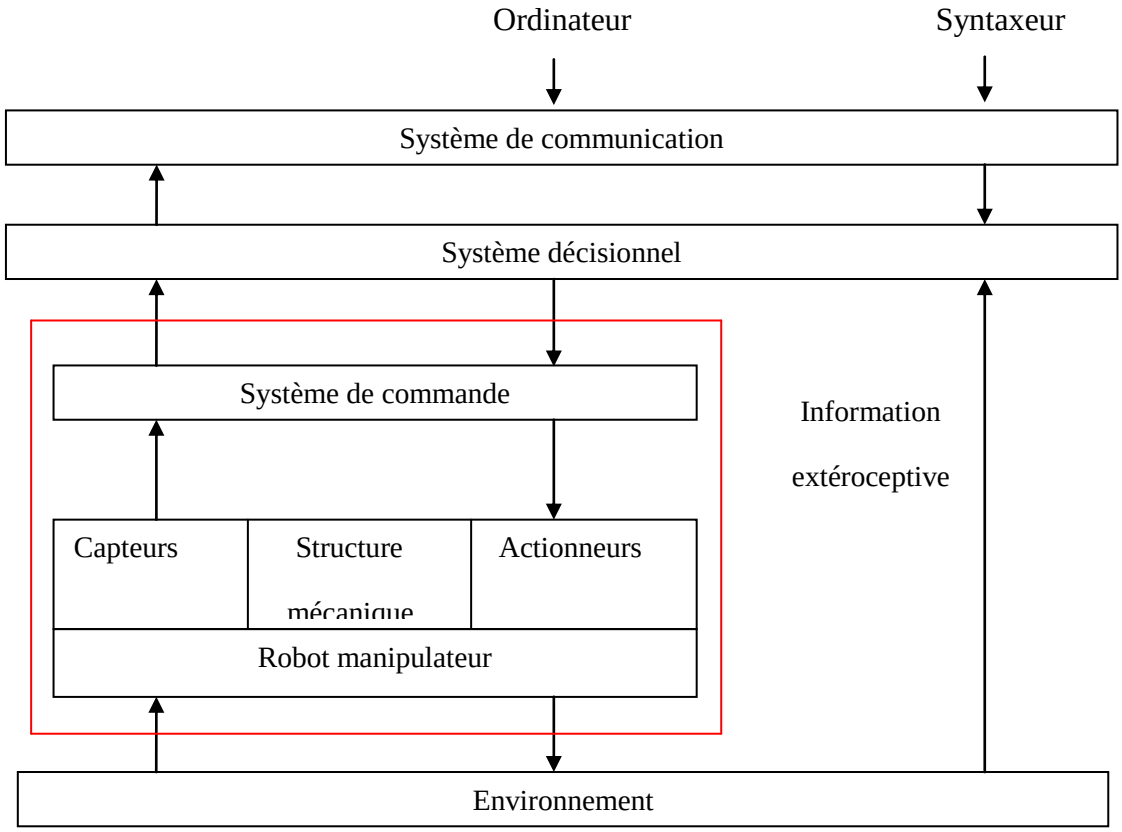


Figure I.5 : Structure générale d'un robot manipulateur [12].

I.5.2. Structure mécanique articulée (SMA)

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un (ou plusieurs) organe terminal qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides reliés entre eux, généralement, les uns à la suite des autres par des liaisons usuelles ou articulations, donc chaque solide est mobile par rapport au précédent.

Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations, il existe différentes topologies de la chaîne cinématique (figures I.6 à I.10) [2].

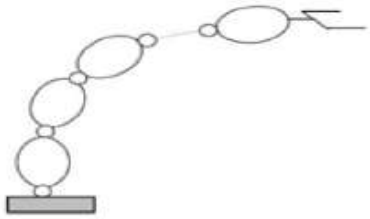


Figure I.6 : Structure ouverte simple.

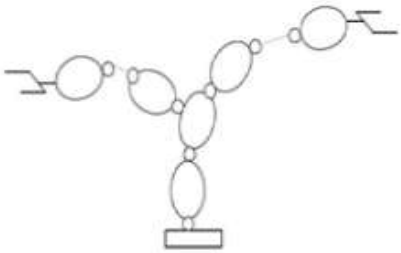


Figure I.7 : Structure arborescente.

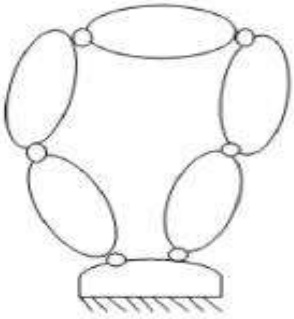


Figure I.8 : Structure fermée simple.

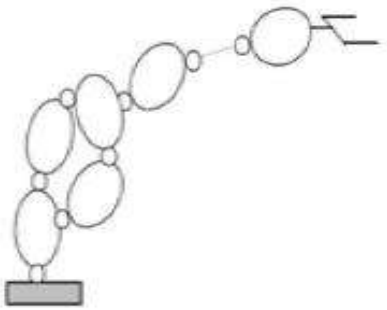


Figure I.9 : Structure fermée.

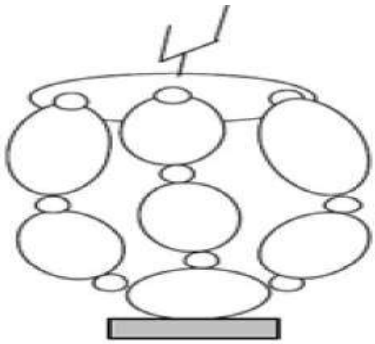


Figure I.10 : Structure Parallèle.

Comme on le constate, les structures de robots manipulateurs étant nombreuses, on se restreint dans ce travail aux robots manipulateur à structure ouverte simple (figure I.6) [12].

I.5.3. Les actionneurs

- **Les moteurs à courant continu :** Les deux enroulements (inducteur et induit) sont alimentés en courant continu, la tension appliquée à l'inducteur étant généralement constante alors que la tension imposée à l'induit est variable. L'avantage de ce mode de fonctionnement est de pouvoir faire varier la vitesse de rotation du moteur de façon continue.

- **Les moteurs pas à pas :** Ce type des moteurs permettent de convertir directement un signal électrique numérique issu d'un calculateur ou d'une logique spécialisée en un positionnement angulaire de caractère incrémental.

- **Les vérins :** Dans un vérin hydraulique linéaire, il y a transformation de l'énergie hydraulique d'un fluide maintenu ou raccordé à une haute pression en une énergie mécanique de translation d'un arbre également appelé tige. Il existe plusieurs catégories de vérins **:**

    - Les vérins à simple effet.
    - Les vérins à double effet.
    - Les vérins numériques [11].

I.5.4. Les capteurs

Le capteur qui a pour objet de traduire en une information exploitable des données présentant des caractéristiques de l'environnement. Il existe plusieurs types, on cite le capteur de vitesse, capteur d'accélération et Les capteurs d'efforts… [11].

Exemples :

- **Capteur de contact** : Le capteur de contact est en fait un capteur de pression : il détecte une pression sur son extrémité orange. Il peut être utile dans les opérations de préemption d'objet (fait d'attraper et de tenir un objet)



Figure I.11 : Contacteur.

- **Capteurs lumineux** : Le capteur optique est un capteur qui mesure une intensité lumineuse (il ne s'agit pas d'une caméra). Il permet ainsi de différentier le blanc du noir et donc par exemple de faire suivre une ligne au sol au robot. Ceci se réalise en forçant le robot _a maintenir une mesure d'intensité proche d'un seuil souhaite qui correspond à une mesure centrale de la ligne à suivre. S'il il s'en écarte, la mesure d'intensité variera.



Figure I.12 : Capteur optique [9].

I.5.5. L'organe terminal

« Effecteur, préhenseur ou pince » C'est l'intermédiaire entre la structure mécanique articulé et la tâche à exécuter. Les effecteurs se répartissent en deux grandes catégories, les préhenseurs d'une part et les outils spécialisés d'autre part [11].

I.5.5.1. Les effecteurs

Les robots sont équipés d'effecteurs leur permettant d'agir dans l'environnement : roue, bras, jambe et pinces…

a- Les organes de préhension

Ils sont utilisés pour saisir et maintenir les objets qui doivent être manipulés et déplacés par le robot. Parmi les applications, on peut citer le chargement et déchargement de

machines, la saisie d'objets sur un convoyeur, le placement d'objets sur une palette de manutention…

Un effecteur multiple comprend plusieurs effecteurs, fixés au même poignet. C'est souvent le cas des organes de préhension pour les applications de chargement-déchargement.

- **Modes de préhension**

Le modèle biologique d'un organe de préhension universel est évidemment la main humaine, qui, avec ses 5 doigts, ses 32 degrés de liberté et un certain nombre de capteurs (position, pression, température,...), (figure 1.13.a) possède une souplesse et une capacité d'adaptation inégalées. Un organe de préhension mécanique conçu à l'imitation de la main humaine serait probablement moins performant, plus lourd, maladroit et très cher. En outre, il ne serait pas nécessaire pour beaucoup d'applications, pour lesquelles un organe spécialement conçu sera peut-être même meilleur. Donc en général, le robot aura des organes de préhension adaptés à la tâche à effectuer, souvent amovibles, pouvant être inter changés par un opérateur ou par le robot lui-même. Ces organes de préhension seront le plus souvent des *"pinces"* à 2 doigts ou mâchoires (figure 1.13.b), parfois à 3 doigts, rarement à 5 doigts; ces doigts peuvent être amovibles et interchangeables (figure I.13.a).

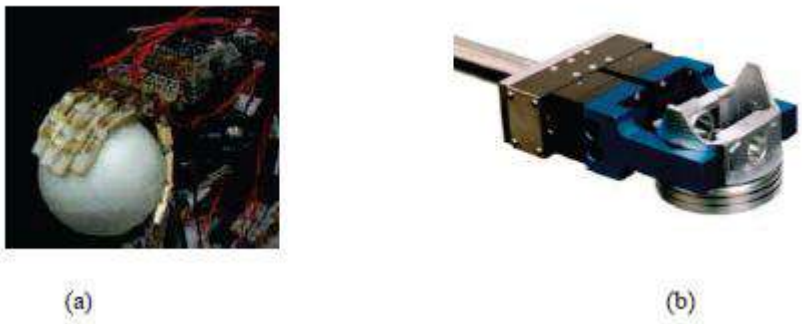


Figure I.13 : Mode de préhension [10].

- **Mécanismes de préhension**

L'ouverture ou la fermeture de la pince peut être commandée par :

- un mouvement de rotation ou,
- un mouvement de translation

Le serrage peut être symétrique ou asymétrique ; la réalisation d'un serrage asymétrique est évidemment plus facile, mais ce type de serrage présente un inconvénient : si on veut éviter un déplacement de l'objet saisi, il faut tenir compte du diamètre de celui-ci lors de la programmation de la position de la pince du robot, de façon à ce qu'une des mâchoires

de la pince vienne affleurer l'objet à saisir ; par contre, dans le cas où le serrage est symétrique, il suffit de programmer la position du centre de l'objet (quelque soit sa taille).

b- Les outils

L'effecteur dans ce cas est dérivé des outils traditionnels: outil pour soudure, pistolet de peinture ou de collage, broches rotatives pour perçage, vissage, meulage, nettoyage, torche de chauffage, découpage, jet d'eau pour découpage…etc.





Figure I.14 : Outil de soudure et préhenseur.

I.5.5.2. Les Pinces

Elles sont largement utilisées dans l'industrie manufacturière. Leur forme dépend de l'élément à saisir et l'environnement dans lequel elles agissent. Elles sont généralement composées de (voir figure 1.15) :

1 : Corps de la pince

2 : Mâchoires

3 : Mors

4 : Rainure de capteur

5 : F = force de serrage sur un doigt seulement

6 : l'élément à saisir

7 : L = distance entre le centre de gravité de la charge et la surface de référence

8 : C = course d'un doigt

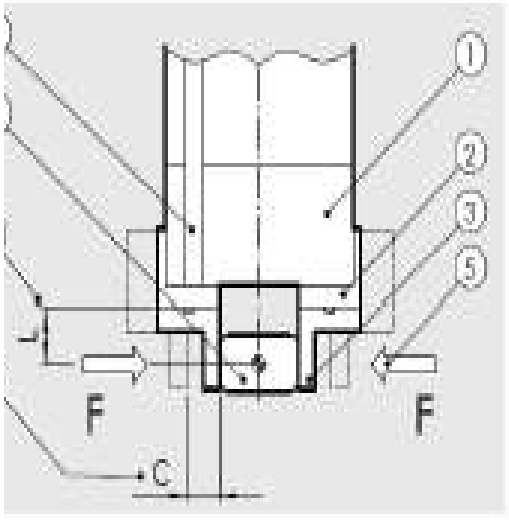


Figure I.15 : Nomenclature d'une pince.

- **Type de pinces**

On peut les classer en fonction du type de déplacement des doigts.

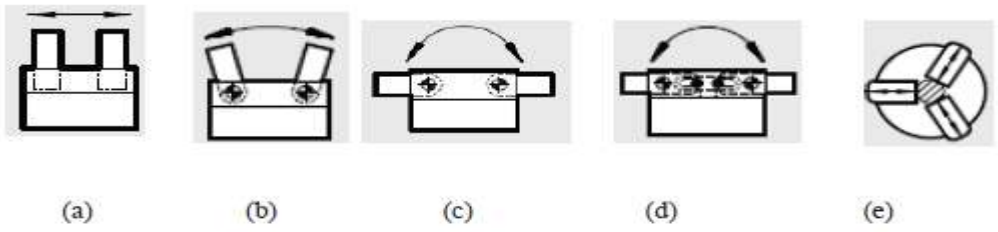


Figure I.16 : Type de pinces [10].

Avec :

(a) Pinces parallèles
(b) Pinces angulaires
(c) Pinces angulaires avec doigts rétractables
(d) Pinces à genouillère
(e) Pince à serrage concentrique(e) (intérieur ou extérieur)

- **Le dimensionnement des pinces**

Le dimensionnement permettra de définir la taille de la pince, c'est-à-dire la force de serrage développée capable d'assurer l'équilibre de toutes les forces statiques et dynamique agissant sur la pièce à manipuler. Il faut ensuite, vérifier la capacité d'absorption de l'énergie cinétique en fin de course du préhenseur choisi. La dernière étape consiste à vérifier que tous les efforts (poids, force d'inertie, effort extérieur…) appliqués sur le guidage en rotation ou en translation des pré-mors sont compatibles avec les charges statique et dynamique maximales admissibles par la pince [10].

I.6. ARCHITECTURE DE ROBOT MANIPULATEUR

I.6.1. Les architectures les plus courantes

Le porteur correspond à l'empilement de trois mobilités s en rotation et/ou en translation, définissant 3DDL. On conçoit que la façon de répartir à la suite les modules de translation et/ou les modules de rotation d'une part, et la possibilité de jouer sur l'orientation (verticale et horizontale) de leur axe d'autre part, entraînent la conception de structures de porteurs d'allures fort différentes les unes des autres ; architecture qui prennent des appellations particulières liées au type de coordonnées qui est privilégié. Parmi toutes les

combinaisons possibles, seules quelques-unes se sont révélées intéressantes pour les applications industrielles. On note que T : désigne une translation R : une rotation [3].

- **Structure cartésienne (PPP)**

A trois liaisons prismatiques, est la plus ancienne, historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure et relativement peu utilisée, sauf dans quelques applications particulières, robots pratiques, robots de magasinage, par exemple.

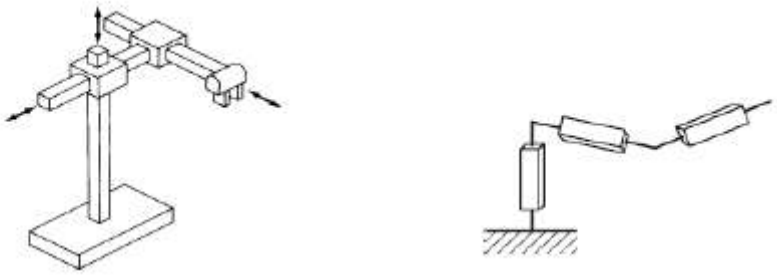


Figure I.17 : Robot cartésien.

- **La structure cylindrique (RPP) ou (PRP)**

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 I.18 : Robot cylindrique.

- **La structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale**

Est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structure cylindrique [7].



Figure I.19 : Robot sphérique [4].

On peut classifier les robots manipulateurs dans le tableau suivant :

Paramètres de classification	classe	
Géométrique de l'espace de travail	morphologie	désignation
	RRP ou RRRP Articulated Assembly)	SCARA(Sélective Compliance Robot arm for
	RPP PPP axes Perpendiculaires 2 à 2	Cylindrique Cartesien
	RRR	Anthropomorphe
Architecture de la chaine cinématique	Série (ou ouverte simple).fermée arborescente ou encore parallèle.	
Type d'énergie des actionneurs	Electrique, Hydraulique, Pneumatique	
Stratégie de commande	Commande en le fermée ou en boucle ouverte	

Tableau I.1 : Classification des robots manipulateurs [11].

I.7. LES MANIPULATEURS ROBOTIQUES LES PLUS UTILISES DANS LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

- **La structure de type SCARA :**

- SCARA (Selective Compliance Articulated Robot arm for Assembly)

C'est un robot à la fois précis et rapide, utilisé dans l'assemblage

- Caractéristiques :

C'est un robot à 3 axes série (RRT), 3 degrés de liberté, son espace de travail est cylindrique [1].



Figure I.20 : Robot SCARA [5].

- **La structure de type Robot Delta :** Le robot Delta est intéressant car les parallélogrammes assurent une bonne rigidité torsionnelle lorsque des couples sont appliqués sur la plate forme mobile. Par contre les pieds des jambes, c'est-à-dire les membrures qui relient l'actionneur rotatif aux parallélogrammes, sont sollicités en flexion par les couples transmis par les parallélogrammes [12].

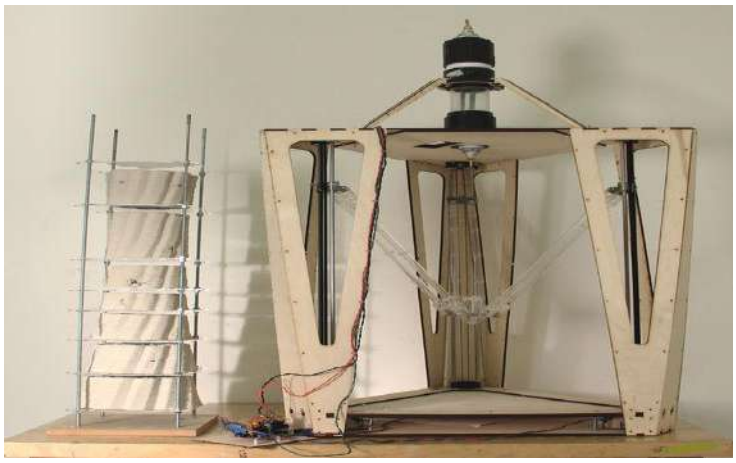


Figure I.21 : Robot Delta**.**

- **La structure de type robot PUMA :** Le PUMA (Programmable Universel Machine de l'Assemblée, ou universel programmable Manipulation Arm) est un bras de robot industriel développé dans une entreprise de robot pionnier Animation. L'ingénierie d'application, l'expérience de la conception et des techniques de fabrication améliorés ont abouti à une ligne de robot puissant avec une longue portée et plus lourds capacités de charge utile. La conception et la flexibilité des robots de pointe offrent de nouvelles possibilités pour la productivité et la qualité amélioration d'un large éventail d'opérations de fabrication. Ce document décrit brièvement l'application, les spécifications et la technologie de l'état de l'art de robot PUMA Animation 560 [12].



Figure I.22 : Robot puma.

Le Tableau suivant représente l'historique de la robotique de manipulation établi a partir du rapport IFR (IFR, 2012)

Année	Robot	Contribution
1959	Unimate	Devol et Engel berger développent le premier robot industriel
1961	Unimate	GM : première installation dans une usine
1962	Versatran	AMF : premier robot de type cylindrique
1969	Unimate	GM installe le robot de soudage par points dans l'usine
1969	Trallfa	Norwegian labor shortage : premier robot de peinture
1973	Famulus	KUKA : premier robot électromécanique a 6 axes entraines
	Hitachi	Premier robot automatique de boulonnage
1974	T3	Le premier robot industriel mini-contrôle arrive sur le marche
		Hi-T-Hand Kawasaki : le premier robot de soudage a l'arc
		IRB-6 ASEA : le premier robot tout-électrique
1975	SIGMA	Olivetti : l'un des premiers utilise aux assemblages
1978	PUMA	Unimation : robot travaille en coopération avec des operateurs
	SCARA	Univ.de Yamanashi :
		Hiroshi Makino développe le robot SCARA
	RE15	Reis : premier robot a 6 axes avec son propre système de contrôle
1979	Nachi	Premier robot pilote par moteurs électriques
1981	Gantry	PAR Système introduit son premier robot portique
1984	Adept One	Adept : premier robot SCARA a entrainement direct
1992	Delta	Demaurex : premier robot pour application d'emballage
1998	Flex Picker	ABB : robot rapide de cueillette (picking)
1999	RV6L-CO2	Reis : robot guide par faisceau laser
2004	NX100	Motoman : commande synchronisée de quatre robots
2006	WiTP	Comau : commande par interface sans fils
2006	Kuka LWR	Kuka robot Léger a 7 axes
2010	LVC	Fanuc: le premier "Learning Control Robot"

Tableau I.2 : Tableau de l'historique de la robotique de manipulation établi a partir du rapport IFR (IFR, 2012) [6].

I.8. LES TYPES D'ESPACE RELATIF DE ROBOT

- **L'espace articulaire :** c'est celui dans lequel est représentée la situation de tous ses corps. On utilise des variables articulaires.

- **L'espace opérationnel :** c'est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal. On utilise des cordonnées cartésiennes, sphérique ou cylindrique.

Autres particularités de robots.

- **La redondance :** Lorsque le nombre de degré de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre de degré de liberté de l'espace articulaire (nombre d'articulations motorisées)

Les qualités requises pour un robot sont la résolution, la précision et la répétabilite.

I.9. CARACTERISTIQUES D'UN ROBOT MANIPULATEUR

Contrairement aux autres machines, les robots présentent une grande flexibilité et une grande souplesse dans leurs utilisations. Ils peuvent même s'adapter aux modifications de l'environnement car ils intègrent différentes technologies.

Le robot est une machine complexe qui intègre de multiples technologies : mécanique, asservissement, électromécanique, électronique, informatique. Les interactions entre ces différents éléments et leurs contributions aux performances du robot sont difficiles à établir.

Actuellement, bien qu'étant conscients du rôle essentiel de l'armoire de commande, nous ne la dissocions pas de la structure mécanique du robot qui est une partie très importante dans la conception de ce dernier. Par conséquent le robot est évalué comme un ensemble complet.

I.9.1. Volume de travail

Le volume accessible par l'outil du robot est le volume qui peut balayer l'outil. Ce volume dépend de la géométrie du robot, de la longueur des segments et du débattement des articulations (limité par des butées).

• **Le poste de travail**

Ou l'environnement dans lequel évolue le robot.



Figure I.23 : Zone de travail d'un robot.

La partie commande synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur [6].

• **L'interface homme-machine**

À travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter,



Figure I.24 : L'ordinateur de contrôle et la télécommande [8].

I.9.2. Répétabilité ou précision

- On dit que le positionnement absolu imprécis lorsqu'il dépasse 1mm, alors on a l'un des erreurs suivantes
  - Erreurs de modèle géométrique.
  - Erreurs de quantification de la mesure de position.
  - Flexibilité.
- **Répétabilité :** la répétabilité d'un robot est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail. En général, la répétabilité ne doit pas dépasser 0.1 mm.

I.9.3. les Performances dynamiques

• Vitesse maximale :

C'est la vitesse de translation ou de rotation de chaque axe du robot. Souvent les constructeurs donnent une vitesse maximale de l'outil ou l'organe terminal.

• Accélération maximale :

Elle dépend de l'inertie, donc de la position du robot. Pour chaque axe, cette accélération est donnée dans la configuration la plus défavorable (inertie maximale, charge maximale).

I.9.4. Charge utile

C'est la charge qui garantie une durée de vie la plus longe possible. Donc, c'est la charge maximale qui peut porter le robot sans perturber ni la répétabilite ni les performances dynamiques du robot. Cette charge utile est nettement inférieure à la charge maximale que peut porter le robot et directement dépendante des actionneurs [1].

I.9.5. Auto adaptabilité à l'environnement

Elle caractérise la capacité d'initiative du robot pour mener à bien des tâches incomplètement spécifiées, et ce ci malgré des modifications imprévues de l'environnement.

I.9.6. Critère relatif à la sécurité

Un système mécanique en mouvement présente, en cas de choc un danger d'autant plus grand que son énergie cinétique est élevé. En conséquence, le concepteur devra (tout en

respectant les contraintes technologiques visant à assurer à la structure du robot une solidité suffisante) minimiser l'inertie du bras manipulateur en utilisant des matériaux appropriés et en allégeant les différents éléments constituant le manipulateur. De plus il devra définir une vitesse maximale du déplacement de l'organe terminal afin de limiter l'énergie cinétique du manipulateur.

I.9.7. Exactitude de trajectoire

Elle caractérise l'aptitude d'un robot à faire suivre à l'interface mécanique une trajectoire commandée « n » fois dans la même direction, et « n » fois dans la direction opposée.

I.9.8. Répétitivité de trajectoire

C'est l'étroitesse de l'accord entre les trajectoires atteintes pour la même trajectoire commandée « n » fois.

I.9.9. Reproductibilité de pose

Elle permet de quantifier les écarts entre les atteintes avant et après un arrêt du robot, cet arrêt du robot peut être un arrêt du système, un arrêt d'urgence ou tout simplement l'arrêt en fin de journée et la reprise le lendemain matin. La valeur de cette caractéristique permettra de se rendre compte si le robot est capable d'accomplir une tâche sans programmation de certains points.

I.9.10. Critère d'ordre économique

Le prix de robot étant dû en grande partie à la configuration de sa structure (élément rigide, lourds et encombrant), ainsi qu'au soin apporté à la réalisation de celle -ci (qualité et précision d'usinages), la solution d'avenir est probablement de remplacer les structures actuelles (rigides, précises) par des structures plus légères, semi-rigide dont la construction plus simple et moins précise entraînerait des coûts de fabrication réduits [11].

I.10. UTILISATION DES ROBOTS

I.10.1. Tâches simples

- La grande majorité des robots est utilisée pour des tâches simples et répétitives.
- Les robots sont programmés une fois pour toute au cours de la procédure d'apprentissage.

- Critères de choix de la solution robotique :
- La tâche est assez simple pour être robotisée.
- Les critères de qualité sur la tâche sont importants.
- Pénibilité de la tâche (peinture, charge lourde, environnement hostile, ...).

- **Exemples :**
  - Robot soudeurs (par points ou a l'arc)
  - Robots de palettisation
  - Autres applications (chargement, polissage, positionnement ...)
  - Applications d'avenir (génie génétique et industrie agro-alimentaire)

I.10.2. Tâches complexes:

Robotique de service : Robot pompiste, Robot grimpeur, Robot laveur d'avion, Robot de construction

Robotique médicale : Computer motion, Assistance aux personnes handicapées, Intuitive surgical [8].

I.11. AVENIR DE LA ROBOTIQUE

• Stagnation du nombre de robots utilisés pour des tâches simples.

• Forte croissance du nombre des robots utilisés pour des tâches complexes :

- Robotique de service,
- Robotique d'assistance aux manipulations dans la recherche biologique et génétique,
- Robotique médicale,
- Robotique ludique [8].
-

I.12. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation de tous les éléments nécessaires pour la description des robots industriels, il contient quelques définitions, la classification des robots ainsi que l'utilisation et l'avenir des robots, Cette présentation est indispensable à la modélisation que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Modélisations d'un robot manipulateur PUMA 560

II.1. INTRODUCTION

La modélisation de Système poly articulé a pour but de représenter au mieux le robot dans son environnement pour ensuite lui programmer des trajectoires avec la planification de mouvement.

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

II.2. CONFIGURATION ET SITUATION D'UN BRAS MANIPULATEUR

- **Bras manipulateur** : **n** corps mobiles rigides reliés par **n** liaisons rotoïdes et prismatiques.

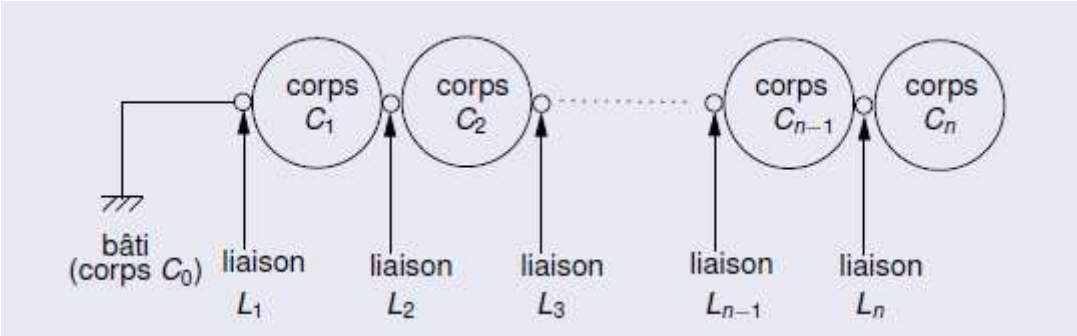


Figure II.1 : Bras manipulateur.

De manière classique, la configuration d'un système mécanique est connue quand la position de tous ses points dans R_0est connue. Pour un bras manipulateur, elle est définie par un vecteur q de n coordonnées indépendantes appelées coordonnées généralisées. La configuration est alors naturellement définie sur un espace N dont la dimension n est appelée indice de mobilité. N est appelée espace des configurations. Les coordonnées généralisées correspondent aux grandeurs caractéristiques des différentes articulations : angles de rotation pour les liaisons rotoïdes, translations pour les liaisons prismatiques. On note $q = (q_1 q_2 \ldots q_n)^T$.

La situation x de l'OT du bras manipulateur est alors définie par m coordonnées indépendantes dites coordonnées opérationnelles, qui donnent la position et l'orientation de

l'OT dans R0. On définira généralement la situation en fonction de la tache `a accomplir : par exemple on pourra ne considérer que la position de l'OT et non plus son orientation. Dans tous les cas, la situation de l'OT est définie sur un espace M, de dimension m ≤ 6, appel´e espace opérationnel. On note $X = (X_1 X_2 \ldots X_n)^T$.

Le choix le plus commun pour les paramètres de position est celui des coordonnées cartésiennes. L'expression de l'orientation de l'OT dépend du choix des paramètres angulaires [13].

II.3. NOTIONS DE BASE

Quelques notions fondamentales propres à la modélisation des robots manipulateurs sont décrites dans cette section [14 ; 15-16]

II.3.1. Coordonnées homogènes

II.3.1.1. Représentation d'un point

Soit P un point de coordonnées cartésiennes P_x P_y P_z, (figure II.2). On appelle coordonnées homogènes du point P les termes $W.P_x$, $W.P_y$, $W.P_z$ et w où w est un facteur d'échelle, égal à 1 en robotique. On représente alors les coordonnées homogènes d'un point par le vecteur :

$$P = \left[P_x, P_y, P_z, 1\right]^T \qquad \text{(II.1)}$$

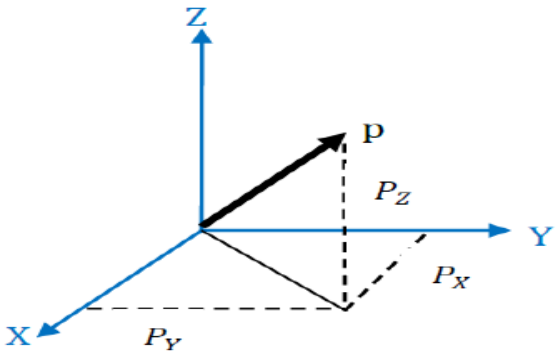


Figure II.2 : Représentation d'un point.

II.3.1.2. Représentation d'une direction

La représentation d'une direction (vecteur libre) se fait aussi par quatre composantes, mais le quatrième est nul, indiquant un point à l'infini. Si l'on note u_x, u_y, u_z les coordonnées cartésiennes d'un vecteur unitaire u, en coordonnées homogènes on écrit :

$$u = [u_x, u_y, u_z, 0]^T \tag{II.2}$$

II.3.2. Transformation homogènes

II.3.2.1. Transformation des repères

Faisons subir une transformation quelconque, de translation et/ou de rotation, au repèreR_i, transformation qui l'amène sur le repère R_j (figure II.3). Cette transformation est définie par la matriceT_i^j, appelée matrice de transformation homogène, de dimension (4×4), telle que :

$$T_i^j = [\, s_i^j \;\; n_i^j \;\; a_i^j \;\; P_i^j \,] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.3.a}$$

Où s_i^j, n_i^j, a_i^j désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes X_j, Y_j et Z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i et où P_i^j est le vecteur exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i.

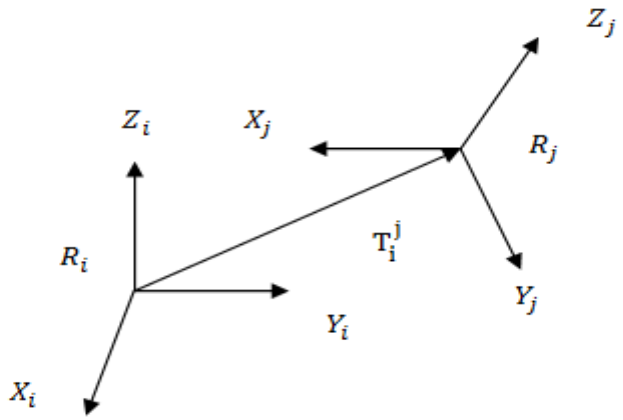


Figure II.3 : transformation des repères.

On dit également que la matrice T_i^j définit le repère R_j dans le repère R_i. Par la suite, on notera souvent la matrice de transformation (II.3.a) sous forme d'une matrice partitionnée :

$$T_i^j = \begin{bmatrix} A_i^j & P_i^j \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_i^j & n_i^j & a_i^j & P_i^j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{(II.3.b)}$$

Il s'agit d'un abus de notation, puisque les vecteurs n'ont alors que trois composantes, mais cette description, en isolant la matrice d'orientation A_i^j, est parfois plus pratique. De toute manière, la distinction entre représentation à trois ou à quatre composantes sera toujours claire dans le contexte.

En résumé **:**

- La matrice T_i^j représente la transformation permettant de passer du repère R_i au repère R_j .
- Elle peut être interprétée comme étant un repère R_j (trois axes orthonormés et l'origine) exprimé dans R_i .

II.3.2.2. Transformation des vecteurs

Soit un vecteur P_j^1 définissant le point P_1 dans le repère R_j (figure II.4). Compte tenu de la définition des coordonnées homogènes, on calcul les coordonnées du point P_1 dans le repère R_i grâce à l'équation suivent :

$$P_i^j = (O_i P_1)^i = s_i^j P_{1x}^j + n_i^j P_{1y}^j + a_i^j P_{1z}^j + P_i^j = T_i^j P_1^j \qquad \text{(II.4)}$$

La matrice T_i^j permet donc d'exprimer dans le repère R_i les coordonnées d'un point données dans le repère R_j .

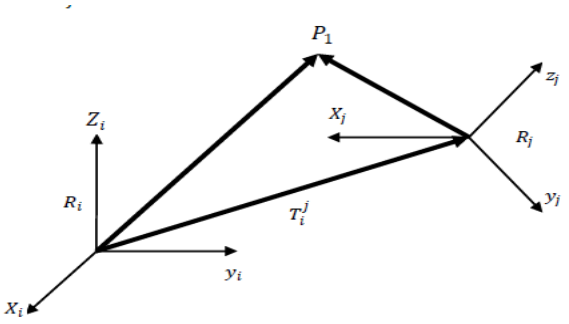


Figure II.4 : transformation d'un vecteur.

II.3.2.3. Matrice de transformation de translation pure

Soit ***trans*** *(a, b, c)* cette transformation, ou *a, b* et *c* désignent les composantes de la translation le long des axes ***x***, ***y*** et ***z*** respectivement. L'orientation étant conservée dans cette transformation, ***trans*** *(a, b, c)* a pour expression (figure II.5).

$$T_i^j = trans(a,b,c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

Par la suite, on utilisera aussi la notation ***trans*** *(**u**, d)* pour désigner une translation d'une vecteur d le long d'un axe ***u***. ainsi, la matrice ***trans*** *(a, b, c)* peut être décomposée en un produit de trois matrices ***trans*** *(**x**, a)* ***trans*** *(**y**, b)* ***trans*** *(**z**, c)*, l'ordre des multiplications étant quelconque.

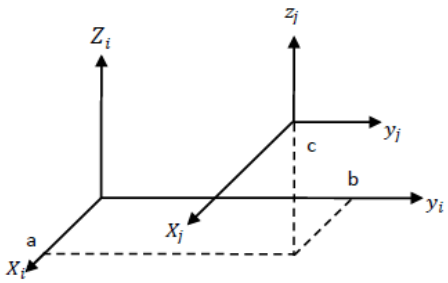


Figure II.5 : transformation de translation pure.

II.3.2.4. Matrice de transformation de rotation autour des axes principaux

- Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe *x* ; Soit ***Rot*** *(x, θ)* cette rotation. On déduit de la figure (II.6) les composantes des vecteurs unitaires s_i^j, n_i^j, a_i^j portés respectivement par les axes x_j, y_j et z_j du repère R_j et exprimés dans R_i. Si l'on note $S\theta$ et $C\theta$ les sinus et cosinus de θ respectivement, elles s'écrivent :

$$\begin{cases} s_i^j = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\ n_i^j = [0 \quad C\theta \quad S\theta \quad 0]^T \\ a_i^j = [0 \quad -S\theta \quad C\theta \quad 0]^T \end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

L'exposant T désignant la transposition. On obtient alors :

$$T_i^j = Rot(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & rot(x,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

Rot*(x, θ)* désignant la matrice d'orientation de dimension (3×3).

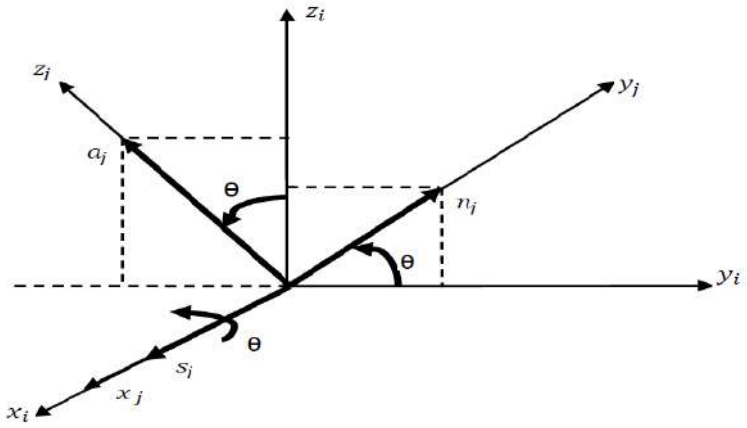


Figure II.6 : transformation de rotation pure autour de l'axe *x*.

- Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe *y* avec un raisonnement analogue, on obtient :

$$T_i^j = Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & rot(y,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

- Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe *z* :

On vérifie que :

$$T_i^j = Rot(z,\theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & rot(z,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

II.2.2.5. Propriétés des matrices de transformation homogène

Une matrice de transformation peut se mettre, d'après la relation (II.3.b), sous la forme :

$$T = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & A & & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

La matrice ***A*** représente la rotation alors que la matrice colonne ***P*** représente la translation. Pour une transformation de translation pure, $\boldsymbol{A=I_3}$ ($\boldsymbol{I_3}$ représente la matrice unité d'ordre 3), tandis que pour une transformation de rotation pure, $\boldsymbol{P=0}$. Les éléments de la matrice ***A*** représentent les cosinus directeurs. Elle ne contient que trois paramètres indépendants (l'un des vecteurs ***s, n*** ou ***a*** se déduite du produit vectoriel des deux autres ; par exemple $\boldsymbol{s=n\times a}$; en outre, le produit scalaire ***n. a*** est nul et les normes de ***n*** et de a sont égales à 1).

- La matrice ***A*** est orthogonale, c'est-à-dire que la matrice inverse est égale à la matrice transposée :

$$A^{-1} = A^T \quad \text{(II.11)}$$

- L'inverse de la matrice T_i^j définit la matrice T_j^i

L'expression (II.4) donne les composantes du vecteur P_j^1 dans le repère R_i. Inversement, pour exprimer les composantes du vecteur P_j^1 dans le repère R_j, on écrit :

$$P_j^1 = T_j^i P_i^1 \quad \text{(II.12)}$$

On peut aussi multiplier à gauche les termes de l'expression (II.4) par $T_i^{j^{-1}}$, inverse de T_i^j :

$$T_i^{j^{-1}} = P_i^1 = P_j^1 \quad \text{(II.13)}$$

On déduit des relations (II.12) et (II.13) que :

$$T_i^{j^{-1}} = T_j^i \quad \text{(II.14)}$$

- L'inverse d'une matrice de transformation représentée par la relation (II.10) peut être calculée par :

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} & A^T & & -s^T P \\ & & & -n^T P \\ & & & -a^T P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T & -A^T P \\ 0\ 0\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.15)}$$

Composition de deux matrices et la multiplication de deux matrices de transformation donne une matrice de transformation :

$$T_1 T_2 = \begin{bmatrix} A_1 & P_1 \\ 0\ 0\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & P_2 \\ 0\ 0\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 A_2 & A_1 P_2 + P_1 \\ 0\ 0\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.16)}$$

Il importe de se rappeler à ce propos que le produit deux matrices de transformation n'est pas commutatif ***($T_1 T_2 \neq T_2 T_1$)***.

- Si un repère R_0 a subi k transformations consécutives (figure II.7) et si chaque transformation *i, (i=1,..., k),* est définie par rapport au repère courant R_{i-1}, alors la transformation T_0^K peut être déduite de la composition des multiplications à droite de ces transformation:

$$T_O^k = T_0^1 T_1^2 T_2^3 \ldots . T_{k-1}^k \quad \text{(II.17)}$$

- Si un repère R_j, défini dans le repère R_i par la transformation T_i^j, subit une transformation $\boldsymbol{T}$ exprimée dans le repère R_i, le repère R_j se transforme en R_j' avec $T_i^{j'} = T T_i^j$

A partir de deux dernières propriétés on déduit que :

- Une multiplication à droite de la transformation T_i^j signifie que la transformation est faite par rapport au repère courant R_j ;

- Une multiplication à gauche signifie que la transformation est faite par rapport au repère de référence R_i [14].

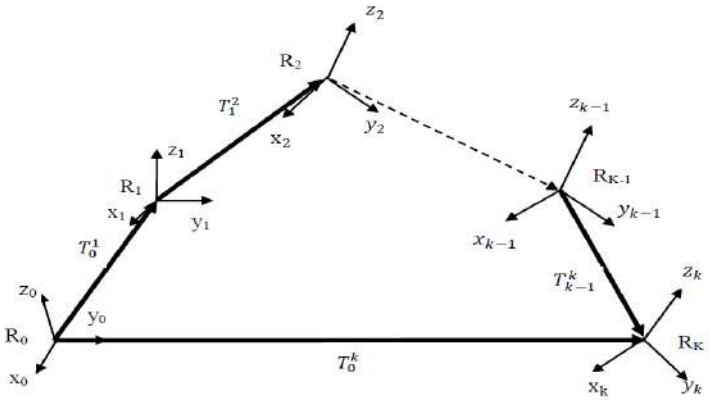


Figure II.7 : composition des transformations : multiplication à droite.

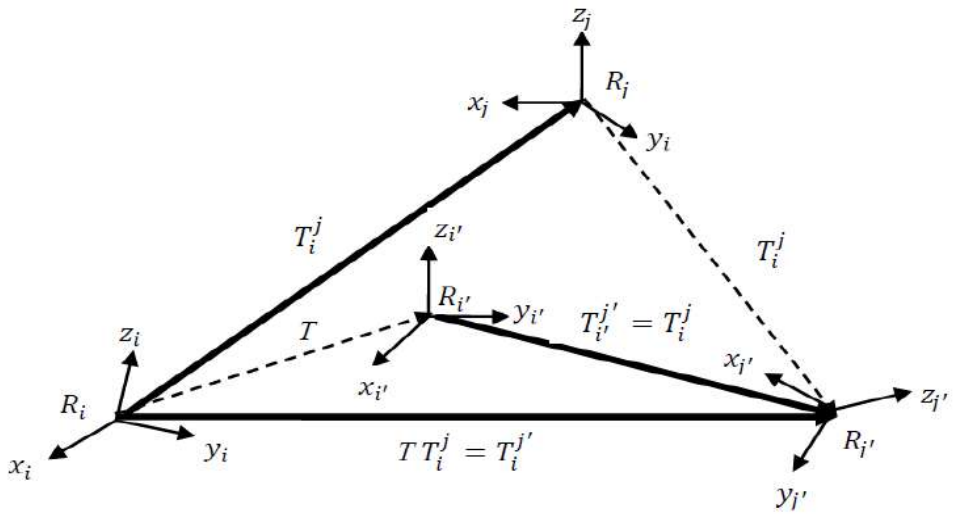


Figure II.8 : composition des transformations : multiplication à gauche.

II.3.3. Paramètres de Denavit et Hartenberg

La convention de Denavit et Hartenberg (DH 1955) est une méthode systématique. Elle permet le passage entre articulations adjacentes d'un système robotique. Elle concerne les chaînes cinématiques ouvertes où l'articulation possède uniquement un degré de liberté, et les surfaces adjacentes restent en contact. Pour cet aspect l'utilisation des charnières ou des glissières est indispensable. Le choix adéquat des repères dans les liaisons facilite le calcul des matrices homogènes de DH et permet d'arriver à exprimer rapidement des informations de l'élément terminal vers la base ou l'inverse.

Méthode destinée à systématiser la modélisation de n'importe quel type de robot série. Ses principaux avantages sont :

- Simplification maximale du modèle géométrique.
- Etablissement d'une norme reconnue par tous.

Les étapes à suivre pour cette technique sont les suivantes :

- Numérotation des segments constitutifs du bras manipulateur de la base vers l'élément terminal. On associe le référentiel zéro à la base de celui-ci, et l'ordre *n* à l'élément terminal (effecteur) ;
- Définition des axes principaux de chaque segment :

- Si z_i et z_{i-1}ne se coupent pas et on choisit x_i de manière à être la parallèle avec l'axe perpendiculaire à z_i et z_{i-1}.

- Si z_i et z_{i-1} sont colinéaires on choisit x_i dans le plan perpendiculaire à z_{i-1}.

- Fixer les quatre paramètres géométriques: d_i, α_i , a_i et θ_i pour chaque articulation tel que :

- d_i coordonnée de l'origine O_i sur l'axe z_{i-1}. Pour une glissière di est une variable et pour une charnière di est une constante.

- θ_i est l'angle que l'on obtient par vissage de x_{i-1} vers xi autour de l'axe z_{i-1}.Pour une glissière qi est une constante et pour une charnière qi est une variable.

- a_i est la distance entre les axes z_i et z_{i-1} mesurée sur l'axe x_i négatif à partir de son origine jusqu'à l'intersection avec l'axe z_{i-1}

- α_i est l'angle entre z_i et z_{i-1} obtenu en vissant z_{i-1}vers z_i autour de x_i.

On forme enfin la matrice homogène DH de déplacement qui lie la rotation et la translation.

La partie supérieure gauche définit la matrice de rotation R_{i-1}^{i}, et le vecteur droit pour la translation d_{i-1}^{i}.

$$T_{i-1}^{i} = \begin{bmatrix} R_{i-1}^{i} & d_{i-1}^{i} \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

Avec

$$R_{i-1}^{i} = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -cos\alpha_i sin\theta_i & sin\alpha_i sin\theta_i \\ sin\theta_i & cos\alpha_i cos\theta_i & -sin\alpha_i cos\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

Et

$$d_{i-1}^{i} = \begin{bmatrix} a_i cos\theta_i \\ a_i sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \tag{II.20}$$

La figure II.9 représente les paramètres de Denavit et Hartenberg pour les deux repères successifs $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ et (x_i, y_i, z_i). Enfin, la matrice de transformation homogène de Denavit et Hartenberg est la suivante [17]:

$$T_{i-1}^{i} = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -cos\alpha_i sin\theta_i & sin\alpha_i sin\theta_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\alpha_i cos\theta_i & -sin\alpha_i cos\theta_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.21}$$

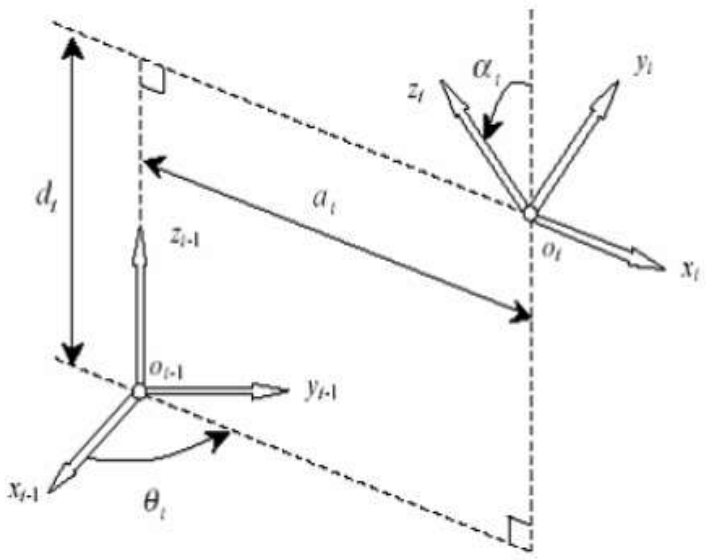


Figure II.9: Systèmes de coordonnées et les paramètres de Denavit et Hartenberg [17].

II.4. MODELE GEOMETRIQUE

II.4.1. Construction des matrices de passage

Le calcul du modèle géométrique direct nécessite les matrices de transformations homogènes entres deux repère liés chacun à deux articulations successives [11].

La structure du robot est composée de 7 corps notés C_0 ... C_6. Le corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_6 désigne le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation i, dont la variable articulaire est notée q_i, connecte le corps C_i au corps C_{i-1}. Ces corps sont supposés parfaitement rigides connectés par des articulations considérés comme idéales (pas de jeux mécaniques, pas d'élasticité). Le repère R_i est lié au corps C_i.

Le passage du repère $\{R_{i-1}\}$ au repère $\{R_i\}$ s'exprime en fonction de quatre paramètres géométriques suivants (figure II.10) :

- α_{i-1}: angle entre les axes Z_{i-1} et Z_i correspondant à une rotation autour de X_{i-1};
- a_{i-1} : distance entre Z_{i-1} et Zi le long de X_{i-1} ;
- θ_i : angle entre les axes X_{i-1}et $X_i$correspondant à une rotation autour de Z_i ;
- d_i: distance entre X_{i-1} et X_i le long de Z_i ;

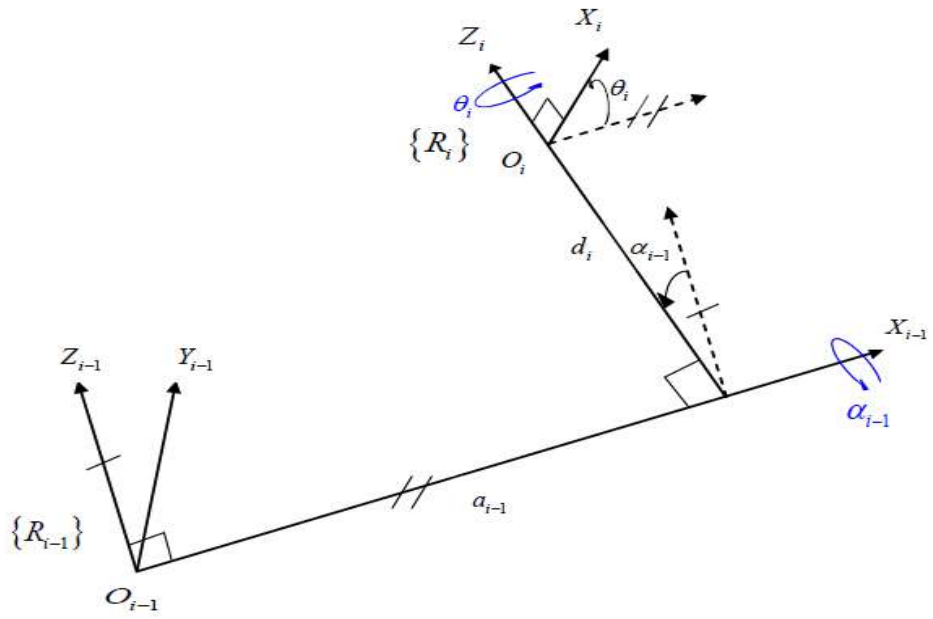


Figure II.10 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple.

La matrice de transformation définissant le repère $\{R_i\}$ dans le repère $\{R_{i-1}\}$ est donnée par la figure II.13.

$$T_{i-1}^{i} = Rot(x,\alpha_{i-1})\ Trans(x,\alpha_{i-1})\ Rot(z,\theta_i)\ Trans(z,d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.22)}$$

Avec

$$Cx_i = Cos(x_i), \qquad Sx_i = Sin(x_i) \quad \text{(II.23)}$$

On trouve :

$$T_{i-1}^{i} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ C\alpha_{i-1}S\theta_i & C\alpha_{i-1}C\theta_i & -S\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ S\alpha_{i-1}S\theta_i & S\alpha_{i-1}C\theta_i & C\alpha_{i-1} & d_i C\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.24)}$$

II.4.2. Présentation du robot PUMA 560

Le robot PUMA 560 est un bras manipulateur à chaîne ouverte simple à 3 articulations rotoïdes, de porteur anthropomorphe (RRR) et poignet rotule (poignet à 3 axes concourants) voire la figure II.12. Disposant, ainsi, de 3 degrés de libertés, pourvu qu'il ne sort pas de son espace de travail, de positionner et d'orienter son organe terminal (3 degrés de liberté pour le positionnement, les 3 autres pour l'orientation) dans n'importe quelle configuration dans l'espace tridimensionnel, où il est non redondant [11] Le terme PUMA signifie Programmable Universel Machine for Assemblé.



Figure II.11 : Vue générale du Robot PUMA 560.

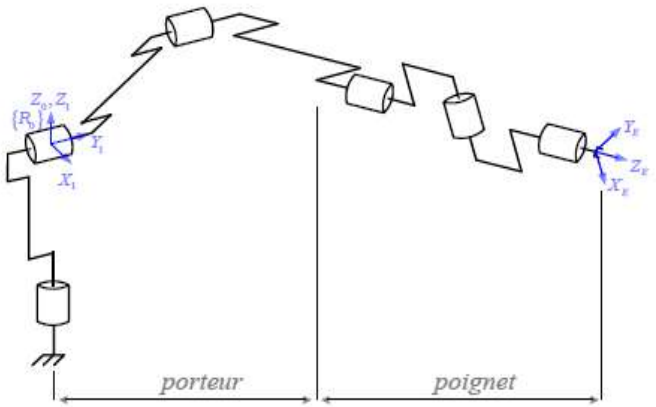


Figure II.12: Manipulateur de bras anthropomorphe et poignet rotule.

La description de la géométrie du robot PUMA 560, ainsi que le placement des repères selon la notation de Denavit-Hartenberg sont indiqués sur la figure II.13.

Les paramètres géométriques du robot PUMA 560 selon la notation de Denavit-Hartenberg (D-H modifiés) sont donnés dans le tableau II.1.

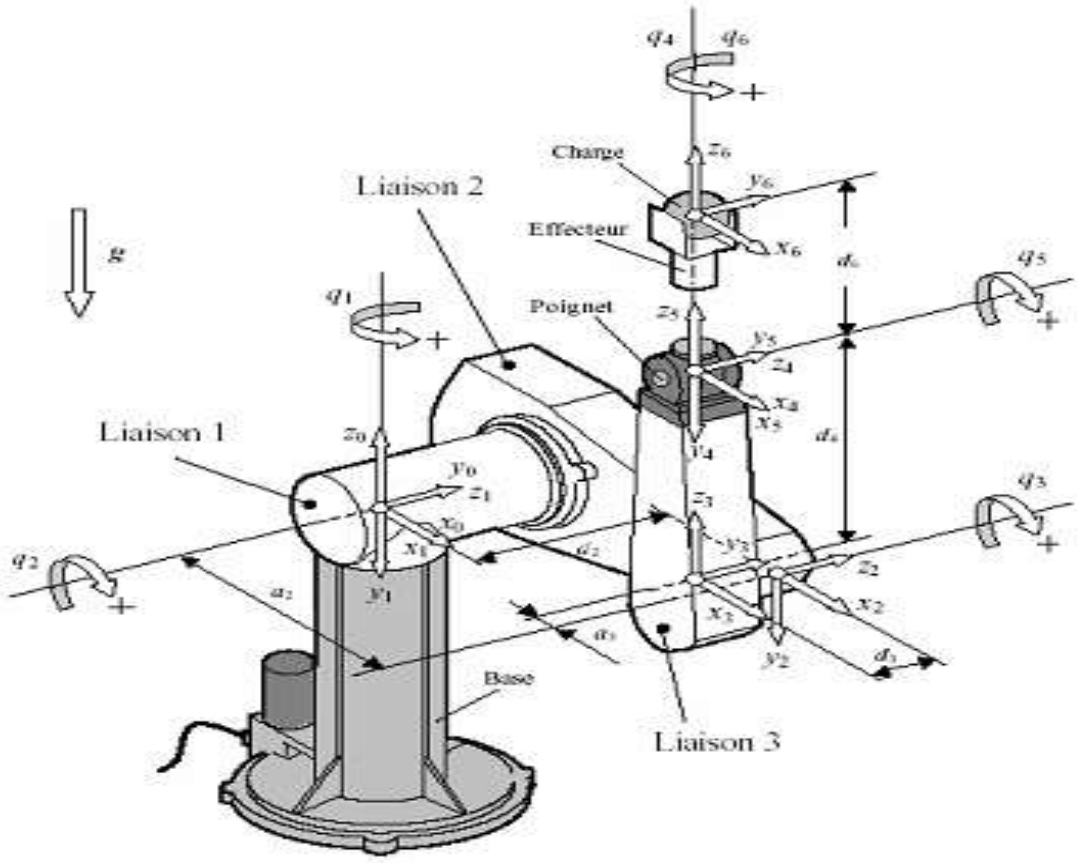


Figure II.13 : Géométrie du robot PUMA 560.

On peut citer les paramètres géométriques dans le tableau suivant :

i	σ	α_{i-1} (degrés)	θ_i	a_{i-1} (mètres)	d_i (mètres)
1	0	0	q_1	0	0
2	0	-90	q_2	0	0.2435
3	0	0	q_3	0.4318	- 0.0934
4	0	90	0	- 0.0203	0.4331
5	0	-90	0	0	0
6	0	90	0	0	0

Tableau II.1 : Paramètres géométriques du robot PUMA 560 (paramètres de D-H modifiés).

En tenant compte des paramètres du tableau II.1, et en utilisant la relation (II.24), on tire les matrices de transformation élémentaires suivantes : Celles du porteur [11 ; 15 ; 18] :

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.25)}$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -S2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & a_2 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.27)}$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.28)}$$

Avec :

$$Ci = Cos(q_i), \qquad Si = Sin(q_i) \tag{II.29}$$

$$Cij = Cos(q_i + q_j), \; Sij = Sin(q_i + q_j) \tag{II.30}$$

II.5. STATIQUE DES ROBOTS

Les modèles géométriques, cinématique et dynamiques permettent d'engendrer des commandes ayant pour effet de déplacer le robot dans son environnement, le calcul des forces et des couples ressentis sur les actionneurs lorsque l'organe terminal, en l'absence de mouvement, est soumis à un effort extérieur ou doit exercer un effort sur son environnement.

II.5.1. Le modèle géométrique

II.5.1.1. Modèle géométrique direct

Le Modèle Géométrique Direct (MGD) permet d'exprimer la situation de l'organe terminal dans l'espace opérationnel de façon unique en fonction de ses coordonnées articulaires :

$$X = MGD(q)$$

On définies comme façon générale que L'étude de la géométrie directe des robots manipulateurs comprend plusieurs étapes pour arriver aux objectifs visés par cette modélisation.

Dans un premier temps on fixe les repères aux différentes parties du mécanisme, ensuite décrit les relations entre ces repères, et aussi on localise ces repères lorsque le manipulateur s'articule. Il peut être représenté par la matrice de passage T_0^4:

$$T_0^4(q) = T_0^1(q_1)\, T_1^2(q_2)\, T_2^3(q_3)\, T_3^4(q_4) \tag{II.31}$$

Il peut aussi être représenté par la relation :$f: N \longrightarrow M$

$$q \longrightarrow x = f(q) \tag{II.32}$$

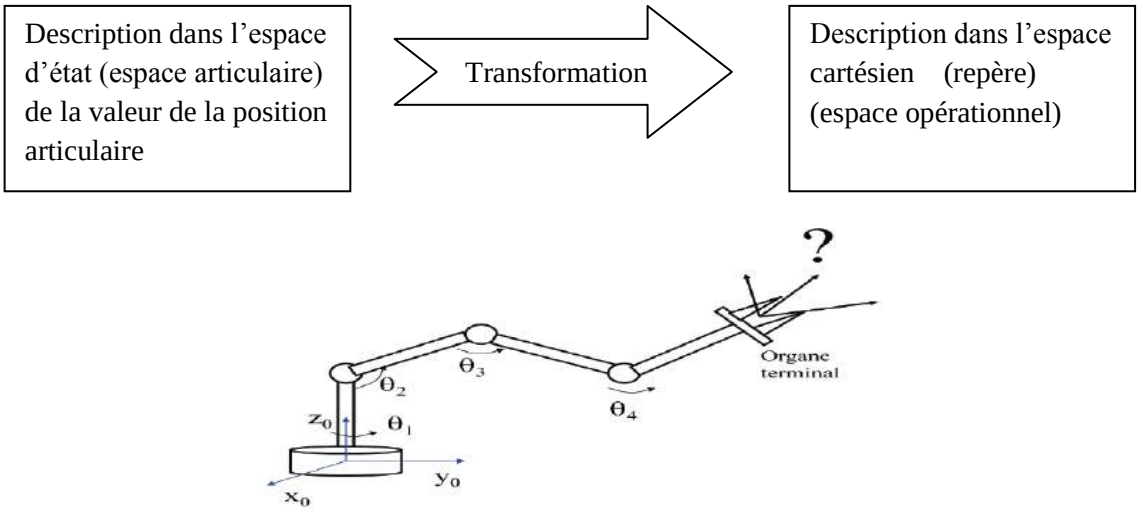


Figure. II.14 : SMA paramétrée [10].

Étant le vecteur des variables articulaires tel que :

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T \tag{II.33}$$

Il existe plusieurs possibilités pour le choix des coordonnées opérationnelles. Pour l'ensemble de ce travail, elles sont choisies :

$$X = [P_X \ P_Y \ P_Z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \tag{II.34}$$

$[P_X \ P_Y \ P_Z \ ]^T$ Étant la position cartésienne de l'organe terminal par rapport au repère de la base$\{R_0\}$, alors que $[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ représente les angles d'Euler selon la représentation correspondants à l'orientation du repère lié à l'organe terminal par rapport à celui lié à la base.

Le calcul du modèle géométrique direct est présenté en utilisant la notation de Denavit- Hartenberg.

Afin de calculer T_0^4, il est préférable de calculer le produit des matrices T_{j-1}^{j} en partant de la dernière matrice de transformation, ceci par deux raisons :

- Les résultats intermédiaires T_j^4, notés U_j, seront utilisés pour le calcul du modèle géométrique inverse.
- On minimise ainsi le nombre d'opérations du modèle.
-

On écrit donc successivement U_j pour $j = 4, \ldots, 0$

$$U_3 = T_3^4 \tag{II.35}$$

$$U_2 = T_2^4 = T_2^3 U_3 \tag{II.36}$$

$$U_1 = T_1^4 = T_1^2 U_2 \tag{II.37}$$

$$U_0 = T_0^4 = T_0^1 U_1 \tag{II.38}$$

$$U_3 = T_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.39}$$

$$U_2 = T_2^4 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & a_3C3 + d_4S3 \\ S3 & C3 & 0 & a_3S3 - d_4C3 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.40}$$

$$U_1 = T_1^4 = \begin{bmatrix} C23 & -S23 & 0 & a_3C23 + d_4S23 + a_2C2 \\ S23 & C23 & 0 & a_3S23 - d_4C23 + a_2S2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.41}$$

$$U_0 = T_0^4 = \begin{bmatrix} C1C23 & -C1S23 & -S1 & C1(a_3C23 + d_4S23 + a_2C2) - (d_2 + d_3)S1 \\ S1S23 & -S1S23 & C1 & S1(a_3S23 + d_4C23 + a_2C2) + (d_2 + d_3)C1 \\ -S23 & -C23 & 0 & -a_3S23 + d_4C23 - a_2S2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{II.42}$$

Les coordonnées de l'organe terminal dans le repaire (x_0, y_0, z_0) fixé à la base, sont données par les trois premières lignes de la quatrième colonne de T_0^4

$$\begin{cases} P_x^0 = C1(a_3C23 + d_4S23 + a_2C2) - (d_2 + d_3)S1 \\ P_y^0 = S1(a_3S23 + d_4C23 + a_2C2) + (d_2 + d_3)C1 \\ P_z^0 = -a_3S23 + d_4C23 - a_2S2 \end{cases} \tag{II.43}$$

II.5.1.2. Modèle géométrique inverse

. Le modèle géométrique inverse (MGI) permet de calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal.

Plus précisément, c'est la forme explicite, lors qu'elle existe, qui donne toutes les solutions possibles dans l'espace articulaire (il y a rarement unicité de solution) à une situation donnée de l'effecteur dans l'espace opérationnel [12].

Puisque la position de l'organe terminale dans l'espace opérationnel est donnée par la quatrième colonne de la matrice de transformationT_0^4, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} P_x^0 \\ P_y^0 \\ P_z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{II.44}$$

On résout les variables $(q_1,\ q_2,\ q_3)$ à partir de ce système d'équations en prémultipliant successivement les deux membres par T_1^0 et T_2^0 pour isoler et identifier les variables articulaires. Les éléments du deuxième membre ont été déjà calculés lors de l'établissement du MGD. Ils sont donnés par la quatrième colonne des deux matrices U_1 et U_2 respectivement [11].

La multiplication par T_1^0, nous donne le premier système d'équations :

$$\begin{cases} C1P_x^0 + S1P_y^0 = a_3C23 + d_4S23 + a_2C2 \\ -P_z^0 = a_3S23 - d_4C23 + a_2S2 \\ -S1P_x^0 + C1P_y^0 = d_2 + d_3 \end{cases} \tag{II.45}$$

La résolution de ce système d'équations nous permet de calculer q_1 et q_3

$$\begin{cases} q_1 = tan^{-1}\frac{P_x^0}{P_y^0} + tan^{-1}\frac{\sqrt{{P_x^0}^2+{P_y^0}^2+(d_2+d_3)^2}}{d_2+d_3} \\ q_3 = \quad tan^{-1}\frac{K}{\sqrt{{a_3}^2+{d_4}^2-K^2}} - tan^{-1}\frac{a_3}{d_4} \end{cases} \quad \text{(II.46)}$$

Avec :

$$K = \frac{{P_x^0}^2+{P_y^0}^2+{P_z^0}^2-{a_2}^2-{a_3}^2-{d_4}^2-(d_2+d_3)^2}{2a_2} \quad \text{(II.47)}$$

La multiplication par T_2^0, nous donne le premier système d'équations :

$$\begin{cases} C2(C1P_x^0 + S1P_y^0) - S2P_z^0 - a_2 = a_3C3 + d_4S3 \\ -S2(C1P_x^0 + S1P_y^0) - C2P_z^0 = a_3S3 - d_4C3 \\ -S1P_x^0 + C1P_y^0 - d_2 = d_3 \end{cases} \quad \text{(II.48)}$$

A partir des deux premières équations nous pouvons calculer q_2

$$q_2 = tan^{-1}\frac{d_4C3-a_3S3}{d_4S3+a_3C3+a_2} - tan^{-1}\frac{P_z^0}{C1P_x^0+S1P_y^0} \quad \text{(II.49)}$$

- L'espace de travail du robot manipulateur considéré l'ensemble des positions joignables par l'espace opérationnel, est donné par la figure ci-dessous. Et le programme qui correspond ce résultat représenté dans l'annexe I

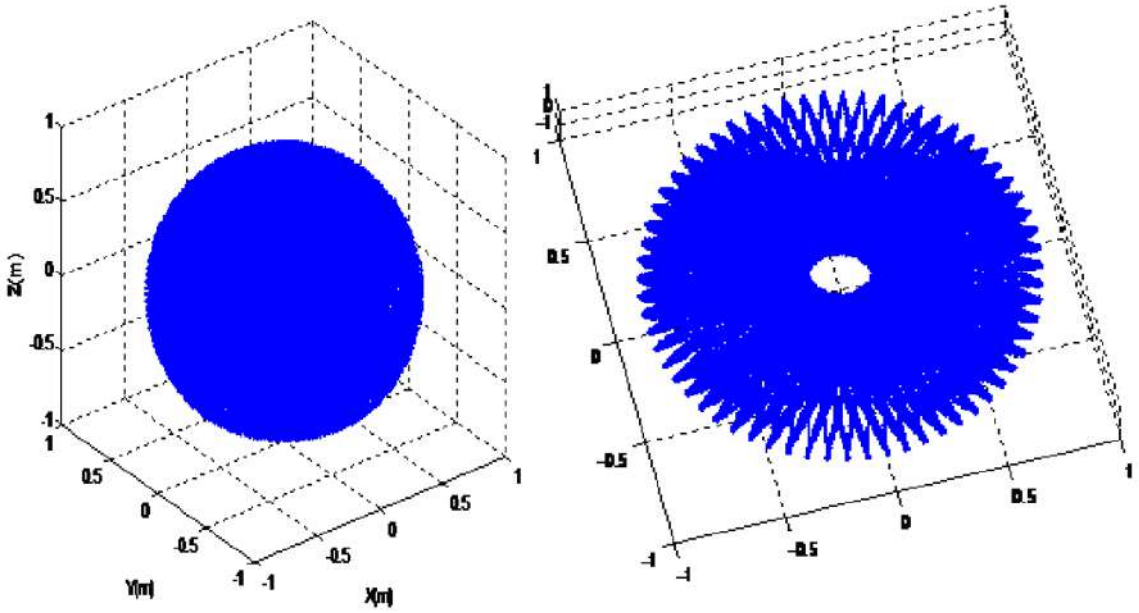


Figure II.15 : représentation de l'espace de travail dans le MG.

II.5.2. Le modèle cinématique

II.5.2.1. Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct nous permet de connaitre les vitesses cartésiennes $(v_x\ v_y\ v_z)$ de l'outil et le vecteur de vitesse de rotation $(w_x\ w_y\ w_z)$ du repère outil en fonction des positions et vitesses angulaires des axes. Les vectrices vitesses cartésienne et vitesse de rotation sont calcules par rapport au repère R_0 fixe et exprimes dans le repère R_0. Le modèle cinématique direct s'écrit sous la forme suivante :

$$[v_x\ v_y\ v_z\ w_x\ w_y\ w_z]^T = J(q)_{(6\times6)}[\dot{q_1}\ \dot{q_2}\ \dot{q_3}\ \dot{q_4}\ \dot{q_5}\ \dot{q_6}]^T \qquad \text{(II.50)}$$

$J(q)$ est la matrice Jacobienne de dimension 6 × 6. La matrice Jacobienne peut être décomposée en deux parties, la partie J_v qui permet de calculer le vecteur de vitesse cartésienne et la partie J_w qui permet de calculer le vecteur de vitesse de rotation, donc on peut l'écrire comme suit :

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_v(q)_{(3\times6)} \\ J_w(q)_{(3\times6)} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.51)}$$

La matrice $J(q)$ permet de relier directement la vitesse de l'outil et la modification de son orientation aux vitesses articulaires du robot. Un autre l'intérêt de la matrice Jacobienne est de pouvoir déterminer les singularités du robot.

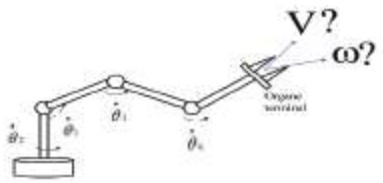


Figure II.16 : Modèle cinématique direct [10].

II.5.2.2. Modèle cinématique inverse

L'intégration de la cinématique inverse permet de préciser le mouvement de l'outil en coordonnées cartésiennes. Le modèle cinématique inverse (MCI) permet de trouver les solutions des vitesses angulaires ($\dot{q}$) de chaque axe a partir des vitesses cartésiennes d'outil ($\dot{X}$) et des positions angulaires (q) de chaque axe :

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\,\dot{X} \tag{II.52}$$

On peut alors calculer le modèle cinématique inverse, mais il faut faire attention aux points singuliers. De plus, la connaissance de la matrice $J(q)$ permet de calculer les accélérations angulaires et cartésiennes (a_t). Si on dérive l'équation (II.50) et l'équation (II.52), on a :

$$a_t = \dot{J}(q)\dot{q}^2 + J(q)\ddot{q} \tag{II.53}$$

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}\left[a_t - \dot{J}(q)\dot{q}^2\right] \tag{II.54}$$

Dans notre étude, pour la commande du robot, on a besoin de l'état du robot, c'est à dire les positions, vitesses et accélérations angulaires et cartésiennes.

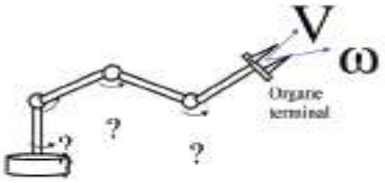


Figure II.17 : Modèle cinématique inverse [10].

II.6. MODELISATION DYNAMIQUE DE LA STRUCTURE MECANIQUE ARTICULEE

Les équations dynamiques d'un robot manipulateur peuvent être obtenues à partir des équations du mouvement de Newton-Euler ou, à partir l'approche énergétique de Lagrange-Euler [11-18]

Considérons le robot manipulateur à n ddl, l'énergie totale du manipulateur $\mathcal{E}$ est la somme des fonctions de l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, notées $\mathcal{K}$ et $\mathcal{U}$ respectivement,

$$\mathcal{E}(q,\dot{q}) = \mathcal{K}(q,\dot{q}) + \mathcal{U}\,(q) \tag{II.55}$$

Avec :

$$q = [q_1 \ \dots \ q_n]^T \tag{II.56}$$

Et,

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = \left[\frac{dq_1}{dt} \quad \dots \frac{dq_n}{dt}\right] \tag{II.57}$$

Le lagrangien $\mathcal{L}(q,\dot{q})$du robot manipulateur à $\boldsymbol{n}$ degrés de liberté est la différence entre l'énergie cinétique $\mathcal{K}$ et l'énergie potentielle $\mathcal{U}$,

$$\mathcal{L}(q,\dot{q}) = \mathcal{K}(q,\dot{q}) - \mathcal{U}\,(q) \tag{II.58}$$

Les équations du mouvement de Lagrange pour le manipulateur considéré, sont données par :

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathcal{L}(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}}\right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q,\dot{q})}{\partial q} = \boldsymbol{\tau} \tag{II.59}$$

Sous une forme équivalente :

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathcal{L}(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i} = \boldsymbol{\tau}_i \tag{II.60}$$

Avec : i=1,……,

Où $\boldsymbol{\tau}_i$ sont les forces ou les couples externes délivrés par les actionneurs au niveau de chaque articulation.

II.6.1. le modèle dynamique du robot manipulateur PUMA 560 à trois ddl

Le modèle dynamique d'un robot manipulateur est donné par l'ensemble d'équations de mouvement reliant les couples, les positions, les vitesses et les accélérations des articulations sont décrites ici en se basant sur les travaux des auteurs dans [18 ; 19]. La dynamique des actionneurs est également incluse en considérant un modèle mathématique pour la représentation de ces actionneurs qui sont des moteurs à courant continu (MCC) selon [11].

On exprime les accélérations en fonction des positions, vitesses et couples des actionneurs.

$$M(q)\ddot{q} + B(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + u_{m_0} = \Gamma \tag{II.61}$$

Avec :

$q \in \mathcal{R}^n$: Vecteur des positions communes ;

$\dot{q} \in \mathcal{R}^n$: Vecteur des vitesses communes ;

$\ddot{q} \in \mathcal{R}^n$: Vecteur des accélérations communes ;

$\Gamma \in \mathcal{R}^n$: Vecteur des forces et/ou des couples du moteur ;

$$\Gamma = [\Gamma_1,\ \Gamma_2,\ \Gamma_3]^T \tag{II.62}$$

$M(q)\ \boldsymbol{\epsilon}\ \mathbb{R}^{\boldsymbol{n\times n}}$: Appelée la matrice d'inertie ;

$B(q,\dot{q})\ \boldsymbol{\epsilon}\ \mathbb{R}^{\boldsymbol{n\times n}}$: Appelée la matrice des forces centrifuges et de Coriolis ;

$G(q)\ \boldsymbol{\epsilon}\ \mathbb{R}^{\boldsymbol{n\times 1}}$ **:** Vecteur des forces ou des couples gravitationnelles ;

$\Gamma\ \boldsymbol{\epsilon}\ \mathbb{R}^{\boldsymbol{n\times 1}}$ **:** Vecteur des forces ou des couples externe.

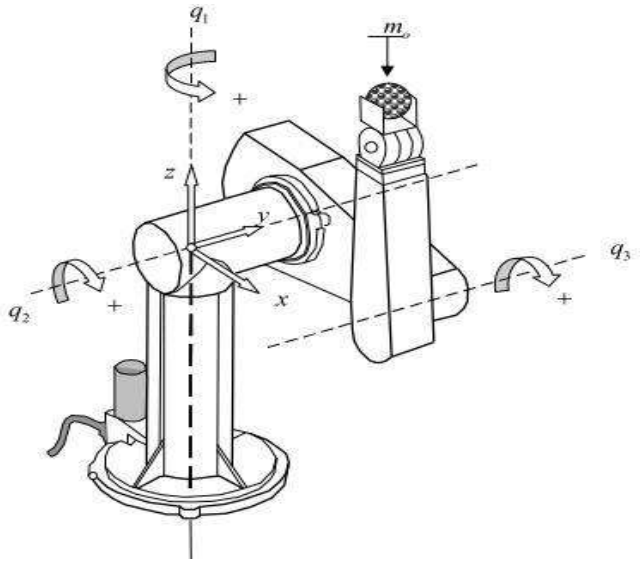


Figure II.18 : Robot manipulateur PUMA 560 [19].

$u_{m_0}(t)\epsilon\mathcal{R}^3$: Vecteur de moment de rotation dû a la charge m_0

$$u_{m_0} = m_0 J^T(q)\left[J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q,\dot{q})\dot{q} + g\right] \quad \text{(II.63)}$$

Où la matrice de Jacobian est définie par :

$$J(q) = \begin{bmatrix} -s_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) - d_2c_1 & -c_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & -c_1(l_3s_{23}) \\ c_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) - d_2s_1 & -s_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & -s_1(l_3s_{23}) \\ 0 & -(l_2c_2 + l_3c_{23}) & -(l_3c_{23}) \end{bmatrix} \quad \text{(II.64)}$$

$\dot{J}(q,\dot{q})$ la dérivé de la matrice de Jacobian obtenue à partir de la différentiation en ce qui concerne le temps [19].

Pour le cas du bras manipulateur PUMA560 à trois degrés de liberté, les matrices du modèle dynamique sont données par les expressions suivantes selon [11-20].

- **Les éléments de la matrice d'inertie M(q) :**

$m_{11} \approx 2.57 + 1.38c_2^2 + .030\ s_2s_3 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_2s_{23}$

$m_{12} = m_{21} \approx 6.90\ x\ 10^{-1}\ s_2 - 1.44\ x\ 10^{-1}\ c_{23} + 2.38\ x\ 10^{-2}\ c_2$

$m_{13} = m_{31} \approx -1.34\ x\ 10^{-1}\ c_{23} - 3.97\ x\ 10^{-3}\ s_{23}$

$m_{22} \approx 6.79 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ s_3$

$m_{23} = m_{32} \approx 0.333 + 3.72\ x\ 10^{-1}\ s_3 - 1.10\ x\ 10^{-2}\ c_3$

$m_{33} \approx 1.16$

- **Les éléments de la matrice $\boldsymbol{B(q, \dot{q})}$**

$b_{11} \approx \left(-2.76\ s_2 c_2 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_{223} + 0.60\ s_2 c_3 - 2.33\ x\ 10^{-2}\ (1 - 2\ s_2 c_3)\right)\dot{q}$

$b_{12} \approx (6.90\ x\ 10^{-1}\ c_2 + 1.34\ x\ 10^{-1}\ s_{23} - 2.38\ x\ 10^{-2} s_2\ )\dot{q}_2 + (2.67\ x\ 10^{-1}\ s_{23} - 7.58\ x\ 10^{-3}\ c_{23} q_3)$

$b_{13} \approx (7.44\ x\ 10^{-1}\ c_2 c_{23} + 0.60\ s_2 c_3 + 2.20\ x\ 10^{-2}\ c_2 s_{23} - 2.13\ x\ 10^{-2}\ )(1 - 2\ s_2 c_3 q_1 + 0.52\ x\ 10^{-1}\ s_{23} - 7.58\ x\ 10^{-3} c_{23} q_3)$

$b_{21} \approx -0.5(2.76\ s_2 c_3 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_{223} + 0.60\ s_2 c_3 - 2.13\ x\ 10^{-2}\ )(1 - 2\ s_2 c_3 q_1)$

$b_{22} \approx (2.20\ x\ 10^{-2}\ s_3 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_3\ )\dot{q}_3$

$b_{23} \approx 0.5(2.20\ x\ 10^{-2}\ s_3 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_3\ )\dot{q}_3$

$b_{31} \approx -0.5(7.44\ x\ 10^{-1}\ c_2 c_{23} + 0.60\ s_2 c_3 + 2.20\ x\ 10^{-2}\ c_2 s_{23} - 2.13\ x\ 10^{-2}\ )(1 - 2\ s_2 c_3) q_1$

$b_{32} \approx -0.5(2.20\ x\ 10^{-2}\ s_3 + 7.44\ x\ 10^{-1}\ c_3\ )\dot{q}_2$

$b_{33} = 0$

- **L'élément du vecteur de gravité G(q)**

$g_1 = 0$

$g_2 \approx -37.2\ c_2 - 8.4\ s_{23} + 1.02\ s_2$

$g_3 \approx -8.4\ s_{23} + 0.25\ c_{23}$

Les paramètres physiques du bras de robot PUMA 560 sont représentés dans *l'annexe I.* Le tableau Annexe I.1 représente les masses des différentes liaisons du manipulateur ; la masse de la première liaison n'est pas présentée dans ce tableau puisque cette liaison ne fait

pas une translation par rapport à la base du robot mais seulement une rotation de l'articulation 1 autour de l'axe Z_0 (énergie potentielle nulle). La mesure de cette masse n'est pas nécessaire.

Les différents moments d'inerties relatifs à chaque liaison en respectant les repères des articulations sont représentés par Le tableau Annexe I.2. La notation simplificatrice I_{xx}, I_{yy} et I_{zz} signifi respectivement le moment d'inertie suivant l'axe X, Y et Z relatif à chaque articulation, et la notation I_{moteur} le moment d'inertie du moteur. Le rapport d'engrenage et le couple maximum de chaque articulation sont présentés par le tableau Annexe I.3.

II.6.2. Modélisation des actionneurs

Les équations électriques des trois actionneurs sont données par la relation matricielle [11].

$$L_a.\frac{d\,I_a}{dt} + R_a.I_a + K_e\,\dot{q}_m = V_a \tag{II.65}$$

Avec :

I_a : Les courants de l'induit des actionneurs.

$$I_a = [i_{a1}\ \ i_{a2}\ \ i_{a3}]^T \tag{II.66}$$

V_a : Les tensions d'alimentation des actionneurs.

$$V_a = [V_{a1}\ \ V_{a2}\ \ V_{a3}]^T \tag{II.67}$$

R_a : Les résistances de l'induit des actionneurs.

$$R_a = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{a3} \end{bmatrix} \tag{II.68}$$

L_a : Les inductances de l'induit des actionneurs.

$$L_a = \begin{bmatrix} L_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & L_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & L_{a3} \end{bmatrix} \tag{II.69}$$

K_e : La constante de la force contre-électromotrice.

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{e1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{e2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{e3} \end{bmatrix} \quad \text{(II.70)}$$

$\dot{q}_m$: La vitesse de rotation angulaire des actionneurs.

$$\dot{q}_m = [\dot{q}_{m1} \quad \dot{q}_{m2} \quad \dot{q}_{m3}]^T \quad \text{(II.71)}$$

Les couples produits par les trois actionneurs sont donnés par l'expression matricielle :

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = K_T . I_a \quad \text{(II.72)}$$

Les vitesses de rotation angulaire des actionneurs sont définies comme:

$$q_m = \begin{bmatrix} q_{m1} \\ q_{m2} \\ q_{m3} \end{bmatrix} = N . \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II.73)}$$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 \\ 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II.74)}$$

N_1, N_2, N_3: Rapports de transmission dans les engrenages des actionneurs.

Avec :

K_T: La constante du couple.

$$K_T = \begin{bmatrix} K_{T1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{T2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{T3} \end{bmatrix} \quad \text{(II.75)}$$

Les paramètres des actionneurs représentés dans le tableau *Annexe I.4.*

II.6.3. Mise du modèle sous forme d'une représentation d'état

Le modèle complet du robot manipulateur donné par le système d'équation (II.64), (II.65) et (II.72) peut réécrit sous la forme d'une représentation d'état reliant les grandeurs

d'entrée (tensions d'alimentation des actionneurs) aux grandeurs de sotie (déplacements angulaires des articulations), en définissant le vecteur d'état $x \in \mathcal{R}^6$:

$$x = [q^T \ \dot{q}^T \ I_a^T]^T \tag{II.76}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -M^{-1}(q).(B(q,\dot{q}) + G(q)) + M^{-1}(q).\Gamma \\ -L_a^{-1}.R_a I_a - L_a^{-1}.K_e.\dot{q}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} \\ L_a^{-1} \end{bmatrix}.V_a \tag{II.77}$$

Alors le modèle complet du manipulateur PUMA à trois degrés de liberté avec considération de la dynamique des actionneurs est d'ordre global n = 9.

Le schéma bloc du modèle dynamique complet du robot manipulateur dans l'espace opérationnel est donné par la figure ci-dessous :

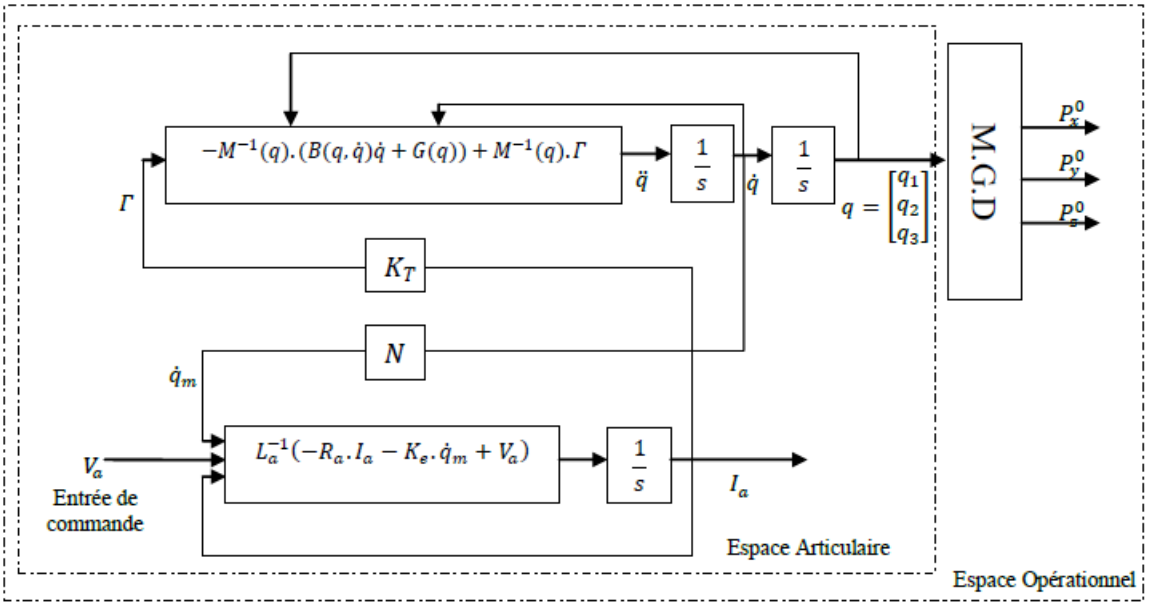


Figure II.19 : Schéma bloc du robot manipulateur des l'espace opérationnel.

L'ordre élevé va compliquer la phase de synthèse de lois de commande. Afin de faciliter la tache de commande, nous proposons dans ce projet de simplifier le modèle proposé, en négligeant l'inductance de l'induit des actionneurs [11].

$$L_{a1}, L_{a2}, L_{a3} \approx 0 \tag{II.78}$$

De l'équation (II.65) l'expression du courant devient :

$$I_a = R_a^{-1}.[V_a - K_e.\dot{q}_m] \tag{II.79}$$

De l'équation (II.72) l'expression du couple devient :

$$\Gamma = K_T.R_a^{-1}.[V_a - K_e.\dot{q}_m] \tag{II.80}$$

Enfin l'équation dynamique simplifiée du robot manipulateur, est obtenu en substituant l'expression (II.80) dans l'équation (II.64):

$$M(q).\ddot{q} + B(q,\dot{q}) + G(q) + \mathrm{u_{m0}} + K_T.R_a^{-1}.K_e\dot{q}_m = K_T.R_a^{-1}.V_\mathrm{a} \tag{II.81}$$

Cette expression peut être mise sous la forme :

$$M(q).\ddot{q} + h(q,\dot{q}) + \mathrm{u_{m0}} = K.V_a \tag{II.82}$$

Avec :

$$h(q,\dot{q}) = B(q,\dot{q}) + G(q) + K_T.R_a^{-1}.K_e\dot{q}_m \tag{II.83}$$

$$K = K_T.R_a^{-1} \tag{II.84}$$

Le modèle dynamique simplifié donné par l'équation (II.82) peut être mis sous la forme d'état :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x).U + d \\ \quad y = [x_1\ x_2\ x_3]^T \end{cases} \tag{II.85}$$

$$x^T = [x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6]^T = [q^T\ \dot{q}^T]^T \tag{II.86}$$

x: Le nouveau vecteur d'état de dimensions 6x1.

y: Les sorties à commander.

d: L'entrée de perturbation dû aux effets de charge.

$$d = -\mathrm{M}^{-1}(\mathrm{x})\mathrm{u}_{\mathrm{m0}} \tag{II.87}$$

$$U = [u_1\ u_2\ u_3\ ]^T = V_a \tag{II.88}$$

U : Le vecteur de commande de dimensions 3x1

$$\mathrm{F(x)} = [\mathrm{f_1(x)f_2(x)f_3(x)f_4(x)f_5(x)f_6(x)}]^{\mathrm{T}} = \left[\mathrm{x_4\ x_5\ x_6}\left(-\mathrm{M}^{-1}(\mathrm{x}).\mathrm{h(x)}\right)^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{II.89}$$

$\mathrm{F(x)}$: Vecteur de dimensions 6x1.

$$\mathrm{G(x)} = [0_{3\times3}^{\mathrm{T}}\ (\mathrm{M}^{-1}(\mathrm{x}).\mathrm{K})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \tag{II.90}$$

$\mathrm{G(x)}$: Matrice de dimensions 6x3.

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des robots manipulateurs. Les modèles géométriques et dynamiques sont établis et décrits. Dans le cadre des applications visées par ce travail, Les modèles géométriques servent à calculer l'attitude (position et orientation) dans l'espace par rapport aux positions angulaires du robot, Les formalismes de Euler permettent d'établir un système d'équations différentielles reliant les coordonnées généralisées aux forces et/ou couples généralisés. Cette procédure nous a permit d'obtenir les modèles dynamiques du robot PUMA 560. Le modèle a permis de mettre en évidence la commander ce genre de bras manipulateur, étant donné les fortes non-linéarités qui régissent le fonctionnement dynamique de ceux-ci.

Nous avons remarqué que le comportement n dynamique du robot manipulateur exige une trajectoire spécifique (continue en position, en vitesse et en accélération), permettant ainsi le contrôle du robot avec des commandes lisses et physiquement acceptables.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder le problème de la commande du bras manipulateur présenté dans ce chapitre.

Chapitre III : Commande de bras manipulateur de type PUMA 560.

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, l'objectif est le développement de la loi de commande linéarisante robuste pour le contrôle de position du manipulateur PUMA 560. La conception de la loi de commande proposée sera réalisée en deux étapes ; d'abord linéarisation entrée-sortie du modèle nominal au moyen d'un retour d'état non linéaire (feedback linearization control method), cette loi de commande repose sur les outils mathématiques de la géométrie différentielle, qui permet par une transformation difféomorphique et un retour d'état non linéaire de découpler et de linéariser le modèle mis sous forme canonique, une fois le modèle du système est linéarisé et découplé, le suivi des trajectoires de référence sera réalisé selon le principe de l'imposition des pôles désirés en boucle fermée [21-24].

Afin d'amélioration de la robustesse de cette technique de commande, nous allons introduire un terme supplémentaire dans la loi de commande globale chargé de rejeter de façon active les effets des perturbations d'origines externes ou internes (variation des paramètres et les imprécisions du modèle).

La commande à rejet actif de perturbation connue sous l'abréviation en anglais ADRC (Active Disturbance Rejection Control) a été d'abord proposé par J. Han dans les années 1990s [25, 26] et encore simplifié et explicité par Z. Gao dans [27, 28]. L'essence de l'ADRC est que la dynamique interne du système ainsi que les perturbations d'origines internes ou externes peuvent être estimé et compensé en temps réel [25]. En raison de sa robustesse et de fort rejet de perturbation, ADRC a été appliquée avec succès dans de nombreux domaines [25, 26].

III.2. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE LINEARISATION AU SENS DES ENTREES-SORTIES

Le concept de la linéarisation au sens des entrées-sorties est maintenant très connu, plusieurs références décrivant la manière de l'appliquer sont disponibles. Nous allons montrer comment obtenir une relation linéaire entre la sortie y et une nouvelle entrée v, en effectuant un bon choix de la loi de linéarisation. Le modèle équivalent étant linéaire, on peut lui imposer une dynamique stable en se basant sur les méthodes linéaires classiques [12, 21-24].

Soit un système d'ordre n, multi-entrées et multi-sorties, décrit par la représentation d'état non linéaire suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x).u \qquad et \qquad g(x)\neq 0$$
$$y = h(x) \tag{III.1}$$

Avec :

u: Vecteur de commande (d'entrée).

$f(x),\ g(x)$: Champs de vecteurs.

$h(x)$*:* Vecteur de sortie.

Les éléments des champs vectoriels *f, g* et h sont des fonctions lisses (différentiables).

Si l'on considère le cas des systèmes avec *m* entrées et *m* sorties, en cherche un bouclage statique de la forme $u = \alpha(x) + \beta(x)v$, tel que le comportement entrée-sortie du système (III.1) après bouclage soit linéaire et découplé. Ainsi on obtient un ensemble de *m* sous système mono entrée mono sotie indépendants où les entrées du sous système *i* n'affectent pas la sortie y_j et réciproquement.

Avec:

v : Nouvelle variable de commande du système linéaire ;

α : Matrice non singulière de dimension $m \times m$;

β : Vecteur de dimension $m \times 1$.

La nouvelle commande permet de ramener le comportement entrée-sortie du système, défini par l'équation (III.1) à celui d'un système linéaire, par différentiation des sorties y_i du système jusqu'à l'apparition des anciennes commande u_i en utilisant la dérivée de Lie.

III.2.1. Dérivée de Lie

Etant donnée la fonction scalaire continue $h_i(x)$ défini de $\mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ et un champ de vecteur $f(x)$ continu défini de $\mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$ le dérivé de Lie de $h_i(x)$ selon la direction du champ vectoriel $f(x)$ est défini comme suit [12, 21-24]:

$$L_f h_i(x) \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} . f(x) = \sum_{i=0}^{n} \frac{\partial h_i(x)}{\partial x_i} . f_i(x) \quad \text{(III.2)}$$

La dérivée de Lie d'ordre k est :

$$L_f^k h_i(x) = L_f \left(L_f^{k-1} h_i(x) \right) = \frac{\partial \left(L_f^{k-1} h_i(x) \right)}{\partial x} . f(x) \quad \text{(III.3)}$$

De la même manière, si g est un autre champ vectoriel, la fonction scalaire$L_g L_f h_i(x)$ est donnée par :

$$L_g L_f h_i(x) = \frac{\partial \left(L_f h_i(x) \right)}{\partial x} . g(x) \quad \text{(III.4)}$$

III.2.2. Technique de la commande non linéaire

L'application de la dérivée de Lie à la sortie y_j du système (III.1), donne la première dérivée comme :

$$\dot{y}_j = L_f h_j \ \sum_{i=1}^{m} L_{g_i} h_j u_i \quad \text{(III.5)}$$

Lorsque la première dérivée de y_j ne dépend d'aucune entrée, alors $L_{g_i} h_j = 0$, $\forall i \in \{1,\dots,m\}$ et la commande n'apparaît pas.

On continue la dérivation de *y*, jusqu'à ce qu'un des coefficients de commande ne soit pas nul.

On peut écrire, dans ce cas :

$$y_j^{(r_j)} = L_j^{(r_j)} h_j + \sum_{i=1}^{m} L_{g_i} h_j^{(r_j - 1)} u_i \quad \text{(III.6)}$$

Avec:

$L_{g_i} h_j^{(r_j - 1)} \neq 0 \ \forall \ x \ \in \ \Omega, \qquad \Omega : ensemble\ des\ états.$

On appelle r_j le degré relatif de la sortie y_j .reste défini comme étant la somme de tous les degrés relatifs obtenus à l'aide de (III.6) et doit être inférieur ou égal à l'ordre du système [21-24]:

$$r = \sum_{i=1}^{m} r_j \ \leq n \quad \text{(III.7)}$$

On dit que le système(III.1) a pour degré relatif *(r)* s'il vérifie:

$$L_{g_i} L_f^k h_j = 0,\ 0 < k\ < r_j\ - 1,\ 1 \le j \le p,\ 1 \le i \le m$$

$L_{g_i} L_f^k h_j\ \neq 0 \qquad\qquad k = r_j\ - 1$

Dans le cas où le degré relatif total est égal à 1'ordre du système, on est en présence d'une linéarisation au sens des entrées-états. Si par contre le degré relatif total est strictement inférieur à l'ordre du système, la linéarisation est dite linéarisation au sens des entrées sorties [12, 21-24].

Pour trouver l'expression de la loi linéarisante u permettant de rendre la relation linéaire entre l'entrée et la sortie, on récrit l'expression (III.6) sous forme matricielle:

$$\left[y_1^{r_1} \dots\ y_p^{r_p}\right]^T = \zeta(x) + D(x)u \qquad \text{(III.8)}$$

Avec:

$$\zeta(x) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ : \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{bmatrix} D(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ . & . & & . \\ . & . & & . \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p(x) & L_{g_2} L_f^{r_p-1} h_p(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) \end{bmatrix}$$

$D(x)$: est appelée matrice de découplage du système.

Si on suppose que $D(x)$ n'est pas singulière, la loi de commande linéarisante est donnée par :

$$u = D(x)^{-1}[-\zeta(x) + \nu] \qquad \text{(III.9)}$$

En remplaçant (III.9) dans (III.8), le système équivalent devient linéaire et totalement découplé de la forme:

$$y_j^{(r_j)} = v_j \tag{III.10}$$

Où:

$$\left[y_1^{(r_1)} \dots y_p^{(r_p)}\right]^T = \left[v_1 \dots v_p\right]^T \tag{III.11}$$

Ce qui nous permet de lui imposer n'importe quelle dynamique avec la conception d'un nouveau vecteur d'entrée $v = \left[v_1 \dots v_p\right]^T$

Remarquons que 1'expression (III.11) représente p intégrateurs en cascade [16-17-18].

III.2.3. Conception du nouveau vecteur de commande v

Le vecteur *v* est conçu selon les objectifs de commande. Pour le problème de poursuite envisagé, il doit satisfaire [12, 21-24]:

$$v_j = y_{dj}^{(r_j)} + k_{r_j-1}\left(y_{dj}^{(r_j-1)} - y_j^{(r_j-1)}\right) + \cdots + k_0\left(y_{dj} - y_j\right) \tag{III.12}$$

Où les vecteurs $\left\{y_{dj} y_{dj}^{(1)} \dots\dots y_{dj}^{(r_j-1)} y_{dj}^{(r_j)}\right\}$ définissent les trajectoires de référence imposées pour les différentes sorties.

Si on remplace (III.12) dans (III.10), on arrive à la dynamique de poursuite suivante :

$$e_j^{(r_j)} + k_{r_j-1} e_j^{(r_j-1)} + \cdots k_1 \dot{e}_j + k_0 e_j = 0 \tag{III.13}$$

Si les k_i sont choisis de façon à ce que le polynôme $s^{r_j} + k_{r_j-1} s^{r_j-1} + \cdots k_1 s + k_0$ soit un polynôme d'Hurwitz (possède des racines avec des parties réelles négatives), alors on peut montrer que l'erreur $e_j(t) = y_{dj}^{(r_j-1)} - y_j^{(r_j-1)}$ satisfait : $lim_{t\to\infty} e_j(t) = 0$

Le système linéarité en boucle fermée est donné par la figure III.1.

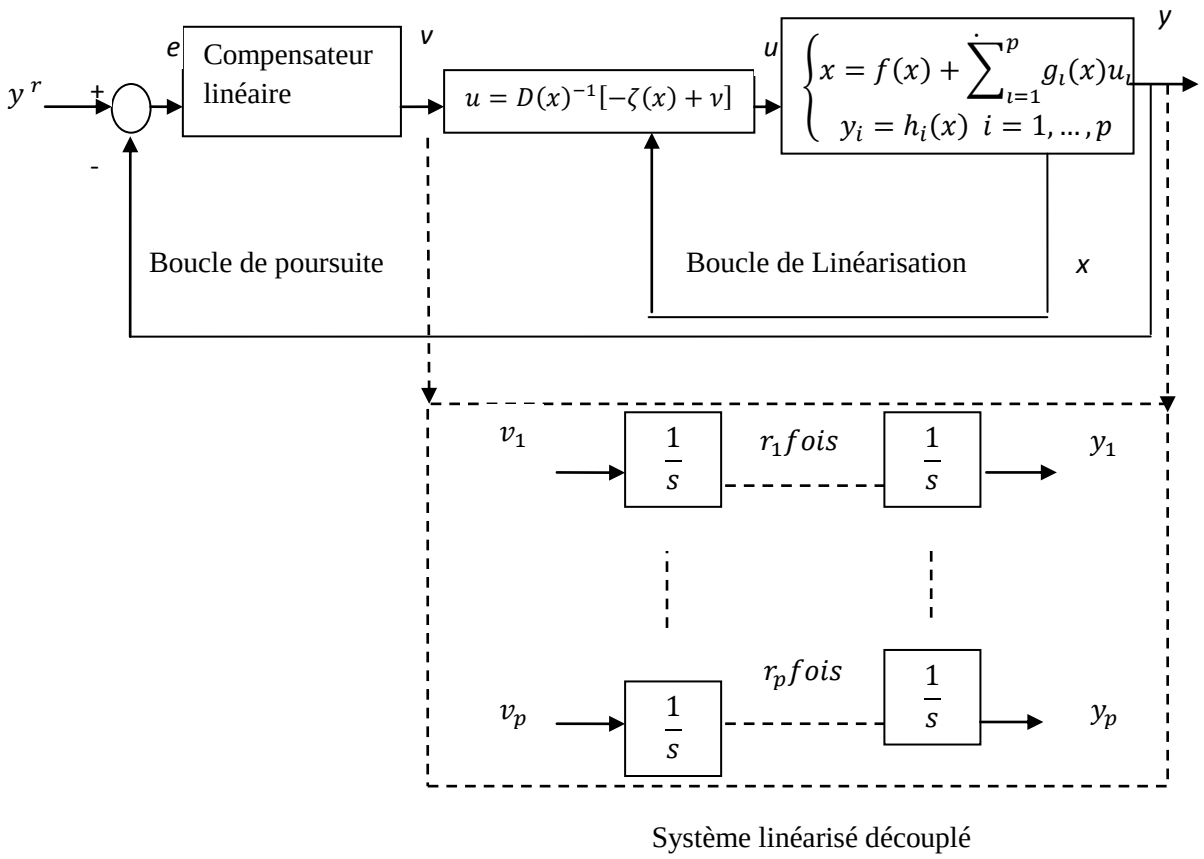


Figure. III.1 : Principe de la commande non linéaire.

III.3. COMMANDE NON LINEAIRE DU BRAS MANIPULATEUR

III.3.1. Choix des sorties

Le choix des sorties est lié aux objectifs de commande, on choisit comme sortie x_1, x_2 et x_3 (les positions angulaires des trois articulations).

On pose :

$$Y(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \\ h_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 = q_1 \\ x_2 = q_2 \\ x_3 = q_3 \end{bmatrix} \qquad \text{(III.14)}$$

III.3.2. Linéarisation entrée/sortie

La condition permettant de vérifier si le système non linéaire admet une linéarisation E/S est la détermination du degré relatif.

III.3.3. Degré relatif

Le degré relatif d'une sortie est le nombre de fois qu'il faut dériver pou faire apparaître au moins un terme de commande.

$$\dot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \dot{h}_1(x) \\ \dot{h}_2(x) \\ \dot{h}_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f h_1(x) \\ L_f h_2(x) \\ L_f h_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 = \dot{q}_1 \\ x_5 = \dot{q}_2 \\ x_6 = \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.15)}$$

$$\ddot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \ddot{h}_1(x) \\ \ddot{h}_2(x) \\ \ddot{h}_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {L^2}_f h_1(x) + L_g L_f h_1(x).U \\ {L^2}_f h_2(x) + L_g L_f h_2(x).U \\ {L^2}_f h_3(x) + L_g L_f h_3(x).U \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{x}_4 = \ddot{q}_1 \\ \dot{x}_5 = \ddot{q}_2 \\ \dot{x}_6 = \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = M^{-1}(x)[-V(x) + K.U] \quad \text{(III.16)}$$

L_f : La dérivée de Lie

La relation (III.15) peut s'écrire sous la forme :

$$\ddot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \ddot{h}_1(x) \\ \ddot{h}_2(x) \\ \ddot{h}_3(x) \end{bmatrix} = A(x) + D(x).U \quad \text{(III.17)}$$

Avec :

$$A(x) = \begin{bmatrix} L^2{}_f h_1(x) \\ L^2{}_f h_2(x) \\ L_f^2 h_3(x) \end{bmatrix} = -M^{-1}(x).V(x) \qquad \text{(III.18)}$$

$$D(x) = \begin{bmatrix} L_g L_f h_1(x) \\ L_g L_f h_2(x) \\ L_g L_f h_3(x) \end{bmatrix} = M^{-1}(x).K \qquad \text{(III.19)}$$

Les degrés relatifs par rapport à chaque sortie q_1, q_2 et q_3 sont $r_1 = 2$, et $r_2 = 2$ et $r_3 = 2$ respectivement.

Le degré global du système $r = r_1 + r_2 + r_3 = 6$, est égale à l'ordre du système $n = 6$. Donc le système est complètement linéarisable par un retour d'état non linéaire.

III.3.4. Transformation difféomorphisme

Le changement de coordonnées non linéaire nécessaire est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} z_1 &= h_1(x) = x_1 \\ z_2 &= L_f h_1(x) = f_4(x) \\ z_3 &= h_2(x) = x_2 \\ z_4 &= L_f h_2(x) = f_5(x) \\ z_5 &= h_3(x) = x_3 \\ z_6 &= L_f h_2(x) = f_6(x) \end{aligned} \qquad \text{(III.20)}$$

L'application du changement de variables (III.20) au système d'équations (II.85) aboutit à l'écriture suivante :

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2 \\
\dot{z}_2 &= L^2{}_f h_1(x) + L_g L_f h_1(x).U = v_1 \\
\dot{z}_3 &= z_4 \\
\dot{z}_4 &= L^2{}_f h_2(x) + L_g L_f h_2(x).U = v_2 \\
\dot{z}_5 &= z_6 \\
\dot{z}_6 &= L^2{}_f h_3(x) + L_g L_f h_3(x).U = v_3
\end{aligned} \tag{III.21}$$

III.3.5. Loi de commande non linéaire

Pour avoir une linéarisation E/S complète en boucle fermée, il faut appliquer le retour d'état non linéaire :

$$U = D^{-1}(x).[V - A(x)] = K^{-1}M(x)[v + M^{-1}(x).V(x)] \tag{III.22}$$

Où *A(x)* et *D(x)* sont donnés par les relations (III.18) et (III.19) respectivement. Le terme $V = [v_1\ v_2\ v_3]^T$ est la nouvelle entrée de commande.

L'application de la loi de commande (III.21) au système d'équation (III.20) aboutit au modèle linéaire découplé (III.22) schématisé par la figure II.2.

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2 \\
\dot{z}_2 &= v_1 \\
\dot{z}_3 &= z_4 \\
\dot{z}_4 &= v_2 \\
\dot{z}_5 &= z_6 \\
\dot{z}_6 &= v_3
\end{aligned} \tag{III.23}$$

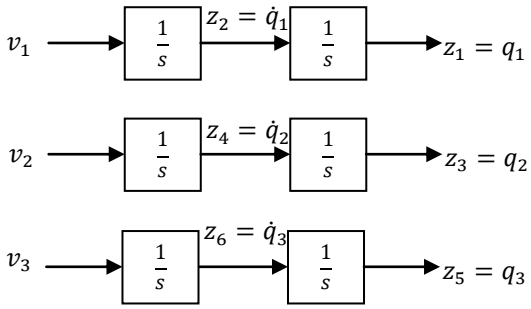


Figure. III.2 : Système linéarisé découplé

III.3.6. Elaboration de la loi de commande externe

Le bouclage non linéaire (III.21) nous a conduits au système linéaire découplé suivant :

$$\frac{d^2q_1}{dt^2} = v_1,\ \frac{d^2q_2}{dt^2} = v_2,\ \frac{d^2q_3}{dt^2} = v_3 \qquad \text{(III.24)}$$

Pour que le système (III.23) arrive à poursuivre les trajectoires de référence (q_{1ref}), (q_{2ref}) et (q_{3ref}) avec une certaine dynamique, on impose à ce système des pôles stables répondant aux performances désirées. Les entrées v_1, v_2 et v_3 peuvent être calculées de la façon suivante:

$$\begin{aligned} v_1 &= \ddot{q}_{1ref} + K_{12}\left(\dot{q}_{1ref} - \dot{q}_1\right) + K_{11}\left(q_{1ref} - q_1\right) \\ v_2 &= \ddot{q}_{2ref} + K_{22}\left(\dot{q}_{2ref} - \dot{q}_2\right) + K_{21}\left(q_{2ref} - q_2\right) \\ v_3 &= \ddot{q}_{3ref} + K_{32}\left(\dot{q}_{3ref} - \dot{q}_3\right) + K_{31}\left(q_{3ref} - q_3\right) \end{aligned} \qquad \text{(III.25)}$$

Les équations des erreurs de poursuite deviennent :

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 + K_{12}\dot{e}_1 + K_{11}e_1 &= 0 \\ \ddot{e}_2 + K_{22}\dot{e}_2 + K_{21}e_2 &= 0 \\ \ddot{e}_3 + K_{32}\dot{e}_3 + K_{31}e_3 &= 0 \end{aligned} \qquad \text{(III.26)}$$

Avec :

$$e_n = \left(q_{n\,ref} - q_n\right)$$
$$e_2 = \left(q_{2ref} - q_2\right)$$
$$e_3 = \left(q_{3ref} - q_3\right)$$

Si on passe dans le plan de Laplace, le système (III.26) devient :

$$\begin{aligned} s^2 + K_{12}s + K_{11} &= 0 \\ s^2 + K_{22}s + K_{21} &= 0 \\ s^2 + K_{32}s + K_{31} &= 0 \end{aligned} \qquad \text{(III.27)}$$

Si les coefficients K_{ij} $(i = 1{,}3\ ;\ j = 1{,}2)$ sont les coefficients d'un polynôme de Hurwitz, la convergence à zéro de l'erreur de poursuite est garantie.

III.4. INTRODUCTION DES EFFETS DES PERTURBATIONS ET DES INCERTITUDES PARAMETRIQUES

En présence des erreurs de modélisation et des perturbations de la charge manipulée, la loi de commande (III.22) peut être réécrite comme **:**

$$U = K^{-1}\widehat{M}(x)\left[v + \widehat{M}^{-1}(x).\ \widehat{}\ (x)\right] \qquad \text{(III.28)}$$

Où $\widehat{M}$, $\hat{h}$ sont les valeurs nominales de M et h. L'incertitude sur les matrices du modèle est donnée par:

$$\Delta M = \widehat{M}(q) - M(q)$$

$$\Delta h = \hat{h}(q) - h(q)$$

Le bouclage non linéaire (III.28) du système (II.82) conduit au découplage suivant avec prise en compte des incertitudes du modèle :

$$\ddot{q} = v + \eta(v, x) \tag{III.29}$$

Où

$$\eta(v, x) = \left(M^{-1}.\widehat{M} - I\right).v + M^{-1}.\Delta h + U_{m0} \tag{III.30}$$

Qui peut être explicité sous la forme

$$\begin{cases} \frac{d^2 q_1}{dt^2} = v_1 + \eta_1(v, x) \\ \frac{d^2 q_2}{dt^2} = v_2 + \eta_2(v, x) \\ \frac{d^2 q_3}{dt^2} = v_3 + \eta_3(v, x) \end{cases} \tag{III.31}$$

III.5. ROBUSTIFICATION DE LA LOI DE COMMANDE LINEARISANTE AVEC UN TERME A REJET ACTIF DE PERTURBATION(ADRC)

Afin de pouvoir expliquer le rôle du terme de rejet actif, considérons un système d'ordre deux décrit par l'équation suivante [27, 30]:

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w) + bu \tag{III.32}$$

Où *f (.)* représente la dynamique du modèle et de la perturbation, *w* est une entrée de perturbation inconnue, *u* est l'entrée de commande, et *y* est la sortie mesurée. On suppose que la valeur du paramètre *b* est connue. Le système (III.32) est ensuite modifié comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2\\ \dot{x}_2 &= x_3 + b.u\\ \dot{x}_3 &= \dot{f}(.)\end{aligned} \tag{III.33}$$

Où $x_1 = y,\ x_2 = \dot{y},\ x_3 = f(y, \dot{y}, w)$. La fonction f est traitée comme un état augmenté. Ici f et $\dot{f}$ sont inconnus. En considérant $f(y, \dot{y}, w)$comme un état, on peut maintenant l'estimer en utilisant un estimateur (observateur) d'état. Les auteurs dans [27,30, 31] ont proposé un observateur non linéaire pour (21) :

$$\hat{\dot{x}} = A.\hat{x} + B.u + L.fal(e, \alpha_i, \delta) \tag{III.34}$$

Où

$$A = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix}0\\ b\\ 0\end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0], L = \begin{bmatrix}L_1\\ L_2\\ L_3\end{bmatrix}$$

L'erreur de l'observateur est $e = y - \hat{x}_1$, $fal(e, \alpha_i, \delta)$ défini comme fonction exponentielle de gain modifié :

$$fal(e, \alpha_i, \delta)|_{i=1,2,3} = \begin{cases}|e|^{\alpha_i}.sign(e), & si\ |e| > \delta\\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha_i}}, & sinon\end{cases} \tag{III.35}$$

Si on choisi $0 < \alpha_i < 1$, $fal(e, \alpha_i, \delta)$ représente un gain élevé lorsque l'erreur est faible. La valeur $\delta > 0$ petite est utilisée pour limiter le gain au voisinage de l'origine.

L'observateur réduit à l'ensemble d'équations d'état suivantes, est désigné sous le nom d'un observateur à état étendu (Extended state observer ESO) :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + L_1 fal(e, \alpha_1, \delta)\\ \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + L_2 fal(e, \alpha_2, \delta) + bu\\ \dot{\hat{x}}_3 &= L_3 fal(e, \alpha_2, \delta)\end{aligned} \tag{III.36}$$

Notons que si l'erreur est petite, l'observateur ESO de vient un observateur linéaire (de Luenberger) :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \beta_1 e \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + \beta_2 e + bu \\ \dot{\hat{x}}_3 &= \beta_{i3} e \end{aligned} \qquad \text{(III.37)}$$

Avec:

$$\beta_i = \frac{L_i}{\delta^{1-\alpha_i}}$$

Les paramètres β_i sont généralement choisis comme [30, 31] :

$$s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = (s + \omega_0)^3 \qquad \text{(III.38)}$$

ω_0 est la bande passante de l'observateur.

En utilisant la méthode de placement de pôle les gains de l'observateur pour le cas

$|e| \leq \delta$ (c.à.d. observateur linéaire) peuvent être évalués :

$$\frac{L_1}{\delta^{1-\alpha_1}} = 3\omega_0$$

$$\frac{L_2}{\delta^{1-\alpha_2}} = 3\omega_0^2$$

$$\frac{L_3}{\delta^{1-\alpha_3}} = \omega_0^3$$

- **Commande robuste**

Dans le cas de paramètres fixes, il est connu que la technique de découplage non linéaire peut devenir instable en présence d'incertitudes. Si les paramètres du modèle ne sont pas connus de façon précise et si l'incertitude sur les paramètres admet des bornes connus, alors les techniques de commande robuste peuvent être utilisées.

La commande active de rejet de perturbation ADRC est alors définie comme une méthode de commande où la valeur de $f(y, \dot{y}, w)$ est estimée en temps réel et compensée par l'utilisation du signal de commande *u*. Comme $\hat{x}_3 \rightarrow f$ il est utilisé pour éliminer activement f par l'application [25-31]:

$$u = (u_0 - \hat{x}_3)/b \tag{III.39}$$

Cette expression réduit le système à :

$$\ddot{y} = (f - \hat{x}_3) + u_0 \tag{III.40}$$

Alors quand $\hat{x}_3 \rightarrow f$:

$$\ddot{y} \approx u_0 \tag{III.41}$$

Le procédé est de type double intégrateur de gain unité, ce qui permet l'utilisation de la loi de commande linéaire :

$$u_0 = \ddot{y}_{ref} + 2\zeta\omega_n\dot{e} + \omega_n^2 e \tag{III.42}$$

Où y_d est la consigne. Les gains de l'observateur L_i et les gains du correcteur linéaire peuvent être calculés par un placement de pôle.

L'application de la loi de commande (III.39) pour le système (III.32) nous donne la dynamique de poursuite en boucle fermée :

$$\ddot{e} + 2\zeta\omega_n\,\dot{e} + \omega_n^2\,e = 0 \tag{III.43}$$

ω_n , ζ Sont respectivement la bande passante et l'amortissement du système en boucle fermée.

La bande passante de l'observateur $\omega_0$est choisie généralement comme :

$$\omega_0 = (3\sim5)\omega_n \tag{III.44}$$

La figure III.3 montre la configuration de la loi de commande linéarisante robustifiée avec un terme à rejet actif de perturbation (ADRC). La conception est basée sur l'idée que chacun des systèmes (III.31) peut être mis sous la forme (III.32) ou :

$$\begin{cases} f_i = \eta_i \\ y_i = q_i \\ b_i = 1 \end{cases}$$

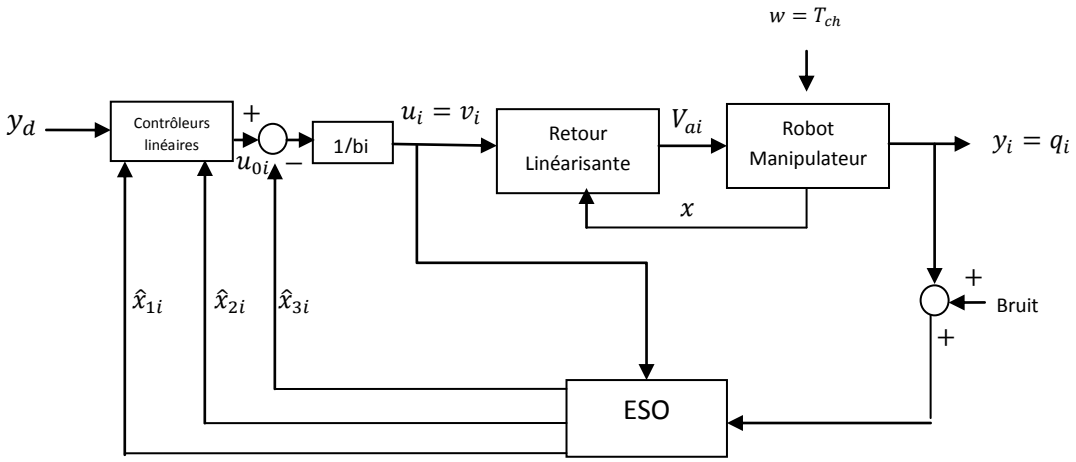


Figure III.3 : Schéma global de la commande linéarisante robuste par l'ajout d'un terme. ADRC.

III.6. DESCRIPTION DE LA TRAJECTOIRE DESIREE DANS L'ESPACE OPERATIONNEL

Le mouvement de l'organe terminal du robot consiste à suivre une courbe, bornée par deux points, sur la surface d'un cône tout en restant perpendiculaire à cette surface comme indiqué à la figure III.4.

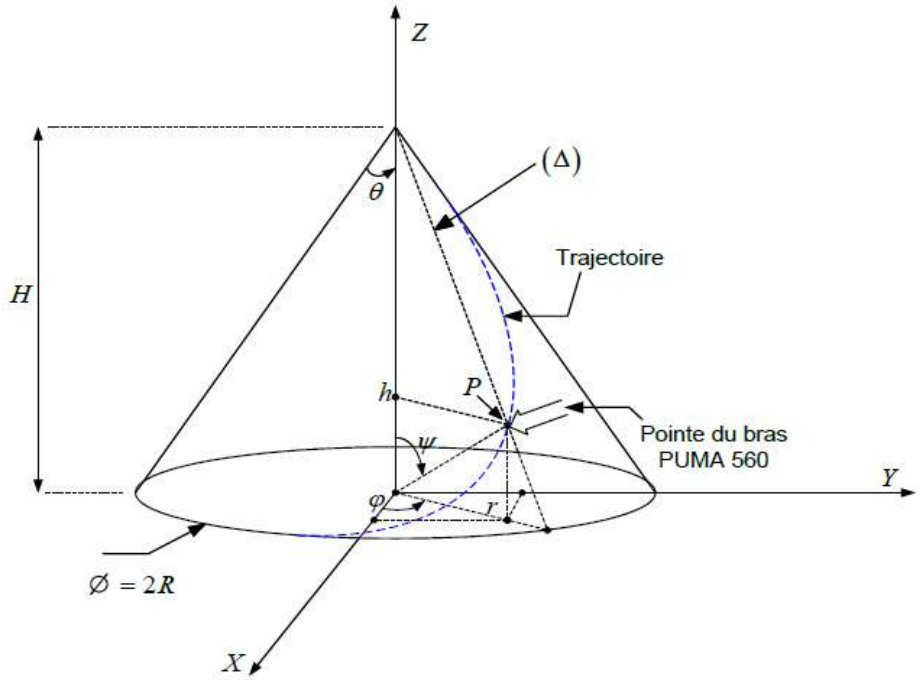


Figure III.4 : Trajectoire conique.

Le cône est défini par sa hauteur *H*, le rayon de sa base *R* et son centre O_c, tel que :

$$O_c = [x_c\ y_c\ z_c\ ]^T$$

La position du point *P* est repérée par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} x_r = x_c + r\cos\varphi \\ y_r = y_c + \sin\varphi \\ z_r = z_c + h \end{cases}$$

Avec:

$$h = v.t$$

$$r = (H - h)\frac{R}{H}$$

$$\varphi = \omega.t$$

III.7. RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES

Ici la stratégie de commande proposée ci-dessus pour le robot manipulateur à trois articulations électriquement commandé est vérifiée par des simulations numériques en utilisant le logiciel Matlab / Simulink.

Afin de tester les qualités de la loi proposée, nous allons considérer trois testes :

Teste 1 : La loi de commande linéarisante entrées sorties classique (sans terme ADRC) est appliquée pour le contrôle de position du modèle nominal du manipulateur PUMA 560 (sans incertitudes paramétriques et sans perturbations externes : sans masse manipulée m_0*=0 Kg)* afin de visualiser les performances de cette méthode en mode de poursuite. Les résultats obtenus dans l'espace articulaires ainsi que dans l'espace opérationnel sont données par les figures III.6 et III.7.

Teste 2 : La loi de commande linéarisante entrées sorties classique (sans terme ADRC) est appliquée pour le contrôle de position du modèle perturbé du manipulateur PUMA 560 (avec incertitudes paramétriques et une masse manipulée m_0*=3 Kg),* l'objectif de ce teste est de tester les qualités de cette loi en mode de régulation (rejet de perturbations). Les résultats obtenus dans l'espace articulaires ainsi que dans l'espace opérationnel sont données par les figures III.9 et III.10.

Teste 3 : La loi de commande linéarisante robuste que nous avons proposé dans ce projet (commande linéarisante entrées sorties classique avec terme ADRC) est appliquée pour le contrôle de position du modèle perturbé du manipulateur PUMA 560 (avec incertitudes paramétriques et une masse manipulée m_0*=3 Kg),* l'objectif de ce teste est de vérifier les améliorations introduite par le terme à rejet actif de perturbations en matière de robustesse vis-à-vis des perturbations d'origines internes ou externes. Les résultats obtenus dans l'espace articulaires ainsi que dans l'espace opérationnel sont données par les figures III.12 et III.13.

Les trajectoires de référence dans l'espace opérationnel sont données par les expressions :

$x_c = 0.4$, $y_c = 0.25$, $z_c = 0.25$, *R = 0.45/2* , *H=0.3* , *v = 0.0065* , $\omega = 2 * pi/Per$

Per = 400

Avec les conditions initiales : $q_1(0) = 0\ rad$, $q_2(0) = 0\ rad$, *et* $q_3(0) = 0\ rad$, $\dot{q}_1(0) = 0 rad$, $\dot{q}_2(0) = 0\ rad$, *et* $\dot{q}_3(0) = 0\ rad$.

Le schéma bloc de la loi de commande du robot manipulateur PUMA 560 dans l'espace opérationnel est donné par la figure ci-dessous:

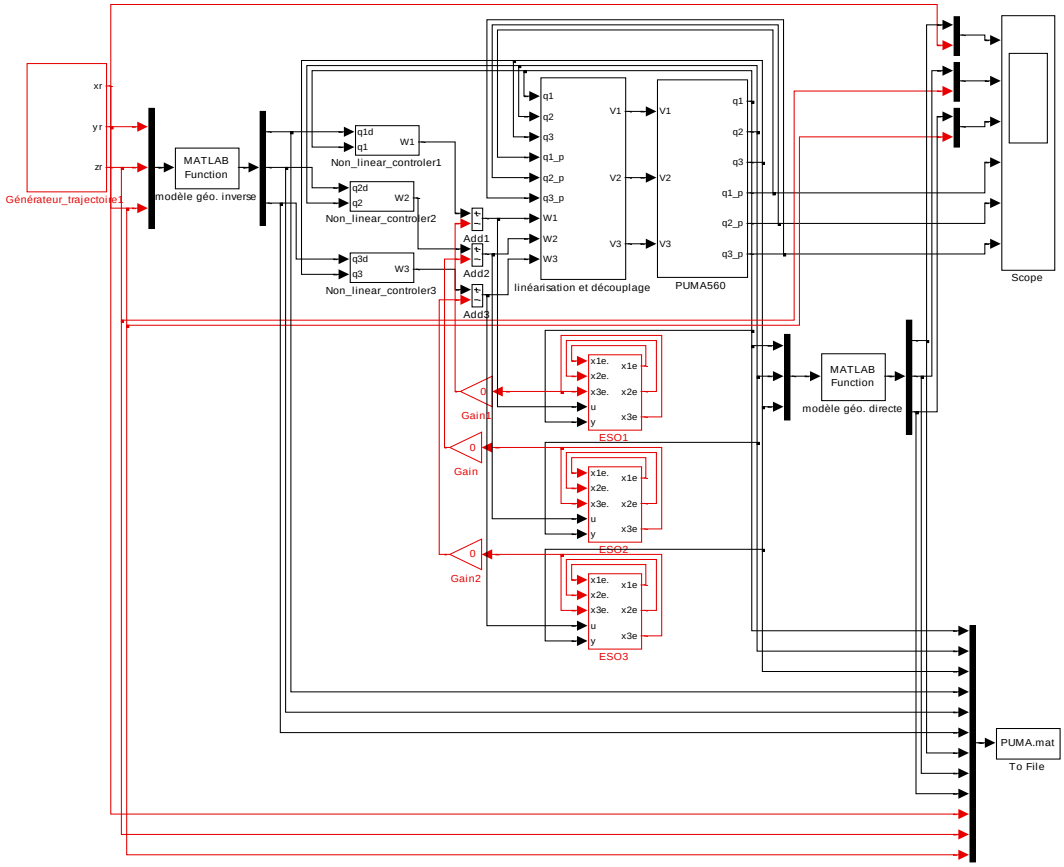
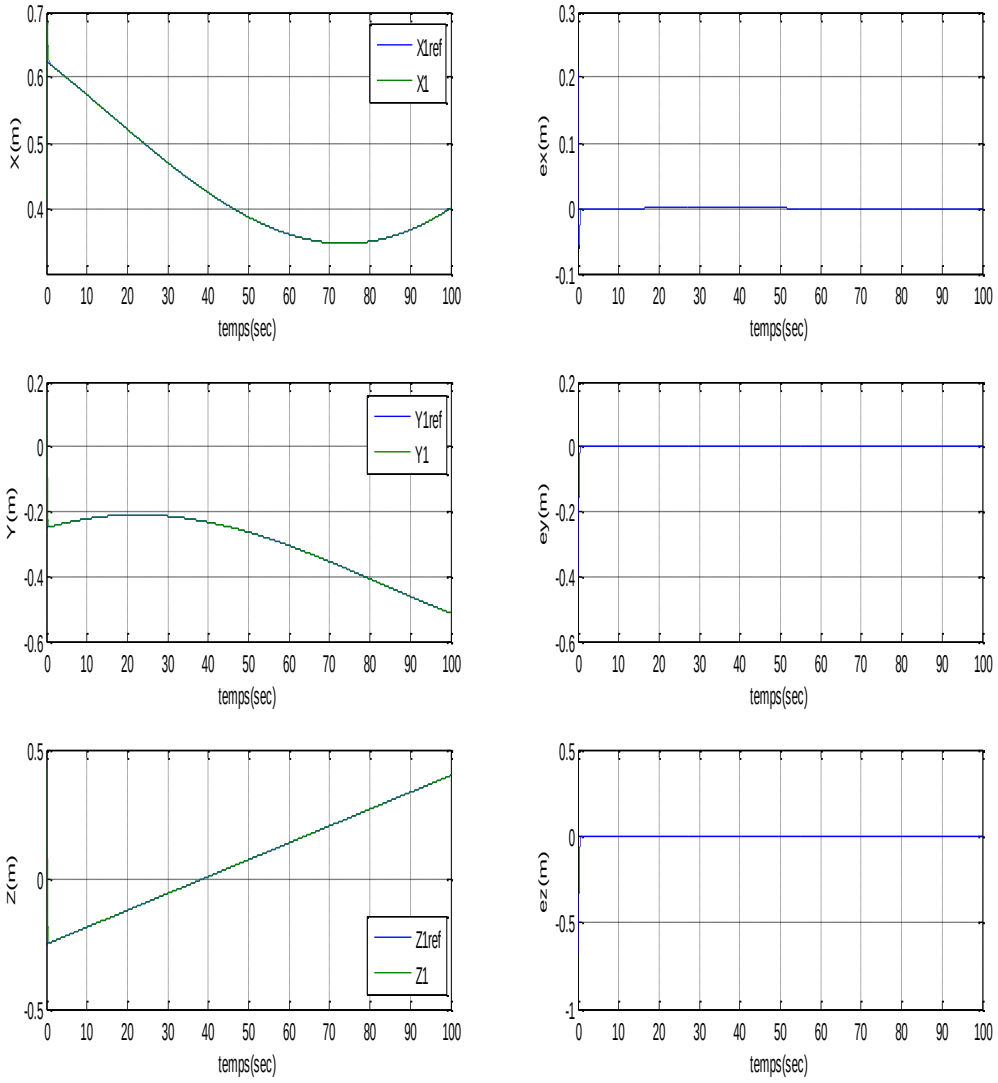


Figure.III.5 : Schéma bloc sous Matlab/Simulink de la loi de commande du robot manipulateur PUMA 560 dans l'espace opérationnel.

<u>Résultats du Teste1 :</u> Commande linéarisante classique appliquée pour la commande du modèle nominal



(a) (b)

Figure III.6 : Résultats de simulation de la commande linéarisante classique dans l'espace opérationnel.

a) Positions *x*, *y*, *z* de l'organe terminal.

b) erreurs de poursuite.

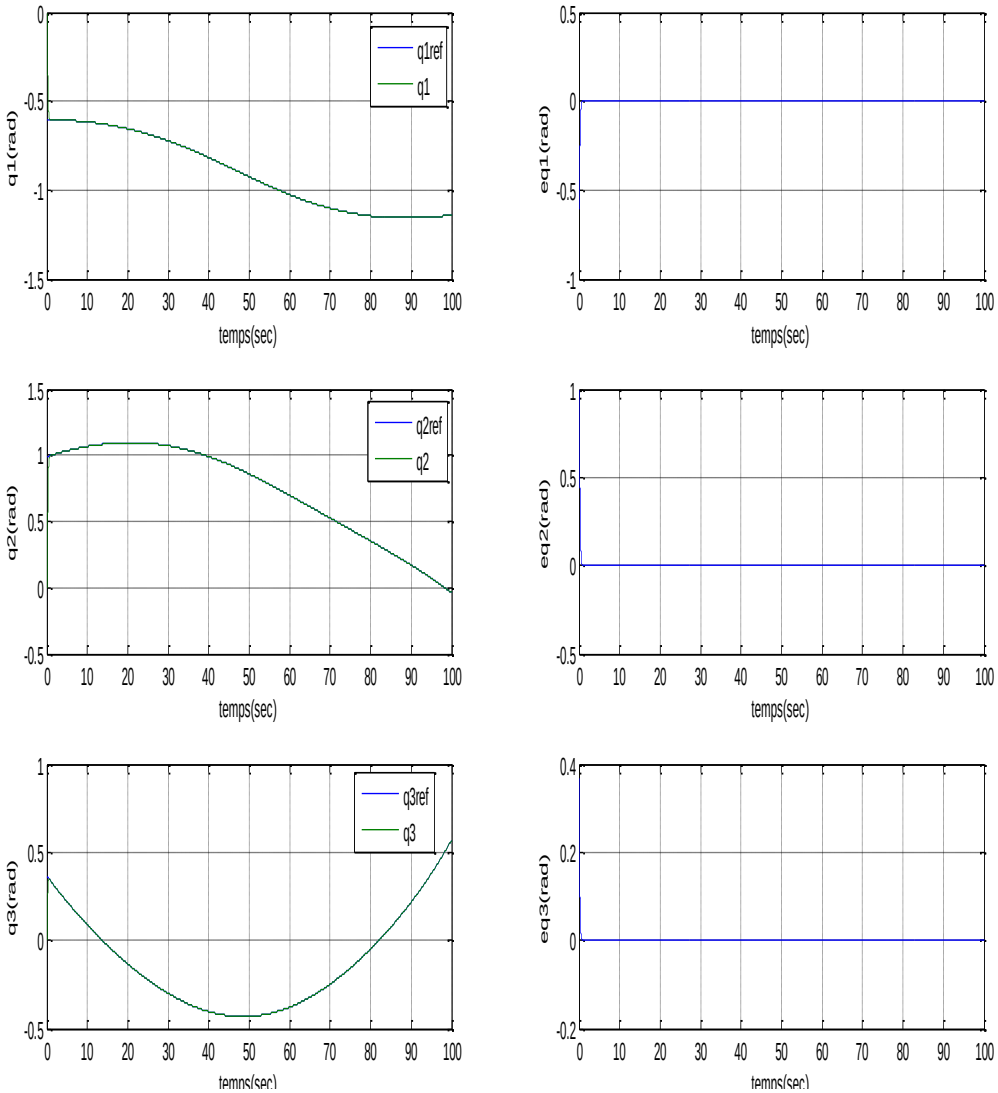


Figure III.7 : Résultats de simulation de la commande linéarisante classique dans l'espace articulaire.

a) Variables articulaires *q1, q2, q3* des trois articulations du manipulateur.

b) Erreurs de poursuite.

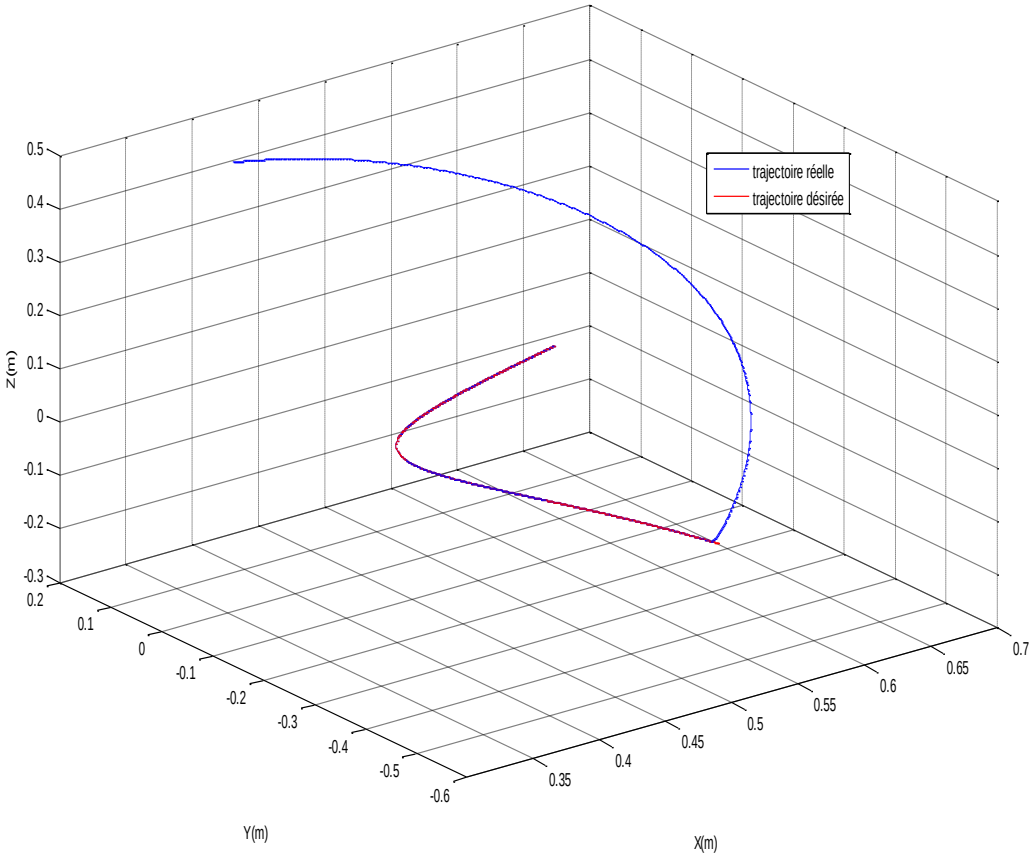


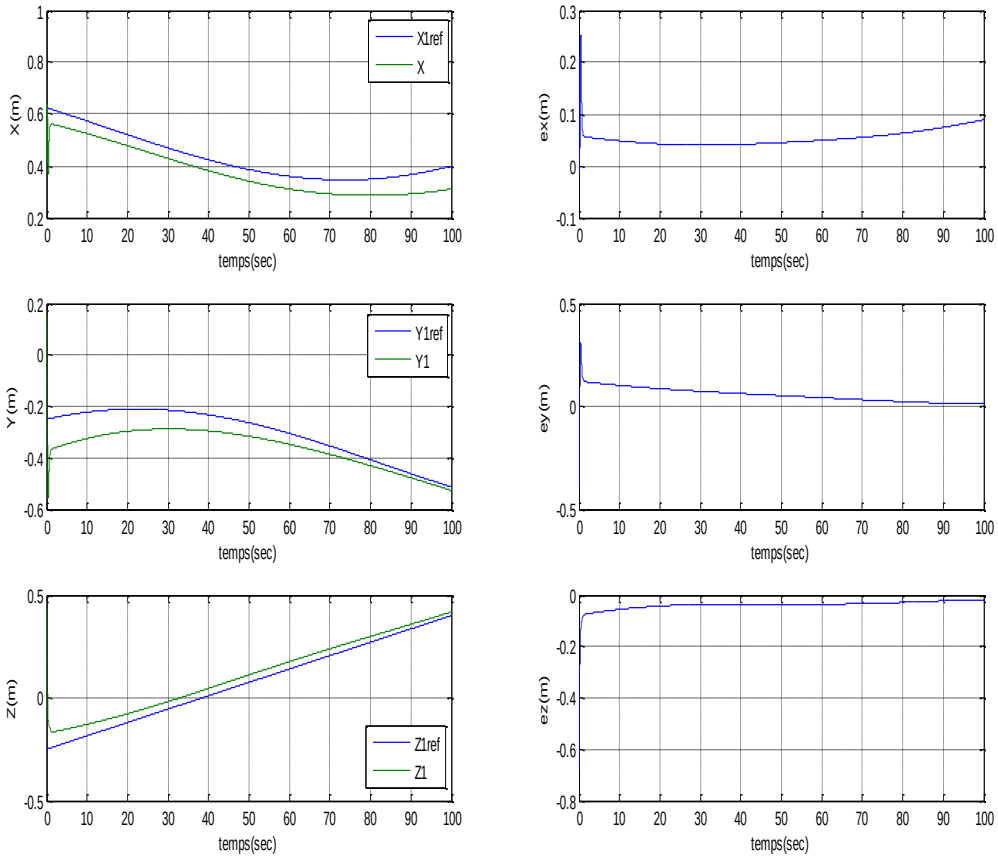
Figure III.8 : représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace tridimensionnel.

Les résultats ainsi obtenus par la simulation numérique du robot manipulateur considéré, montrent clairement l'efficacité de la loi de commande linéarisante E/S du point de vue performances de poursuite, les erreurs de poursuite s'annulent après le régime transitoire.

<u>Résultats du Teste 2 :</u> Commande linéarisante classique appliquée pour la commande du modèle perturbé

On propose dans cette essai d'introduire l'effet de la charge manipulée de masse m_0 ainsi que les effets des erreurs de modélisation sur les matrices du modèle de l'équation (II.61), les erreurs sur les matrices sont définies comme suit:

***ΔM*= 50% de *M*, *Δh*= 50% de *h*, m_0=3Kg.**



(a) (b)

Figure III.9 : Résultats de simulation dans l'espace opérationnel.

a) Positions *x*, *y*, *z* de l'organe terminal.

b) erreurs de poursuite.

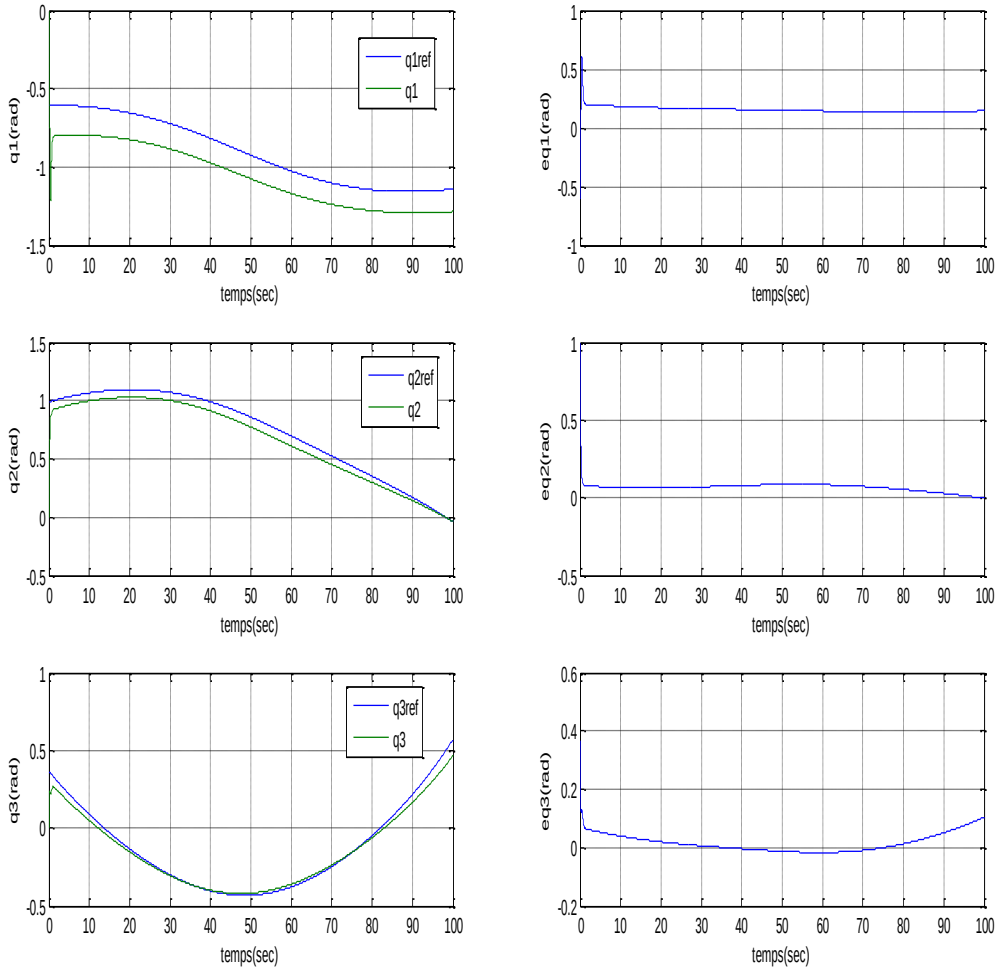


Figure III.10 : Résultats de simulation dans l'espace articulaire.

a) Variables articulaires *q1, q2, q3* des trois articulations du manipulateur.

b) Erreurs de poursuite.

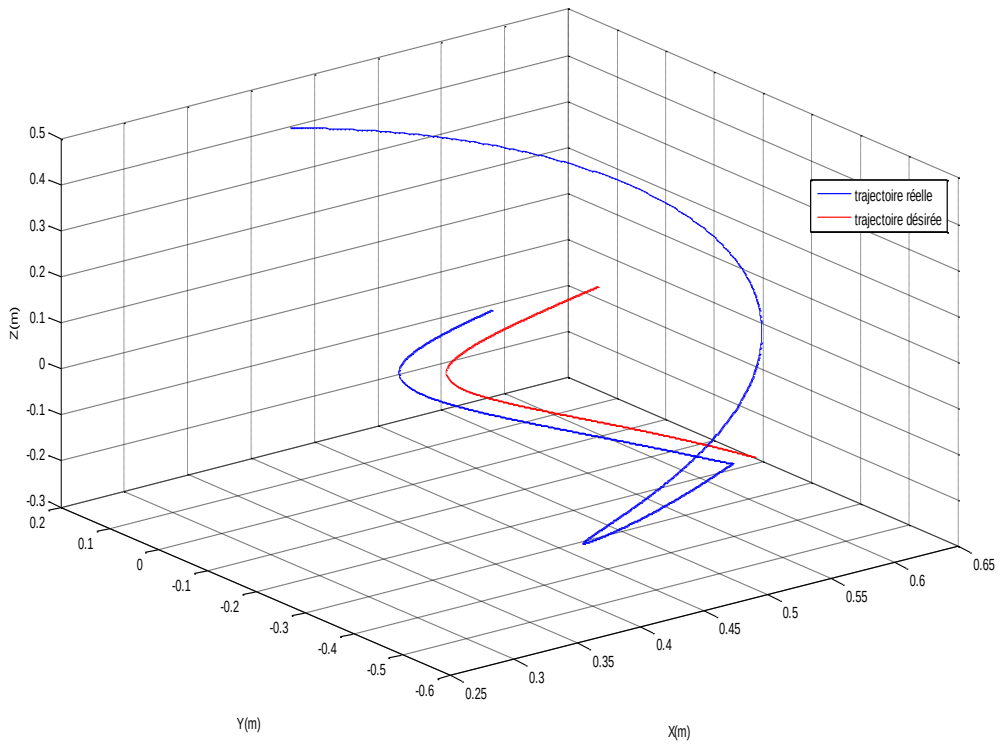


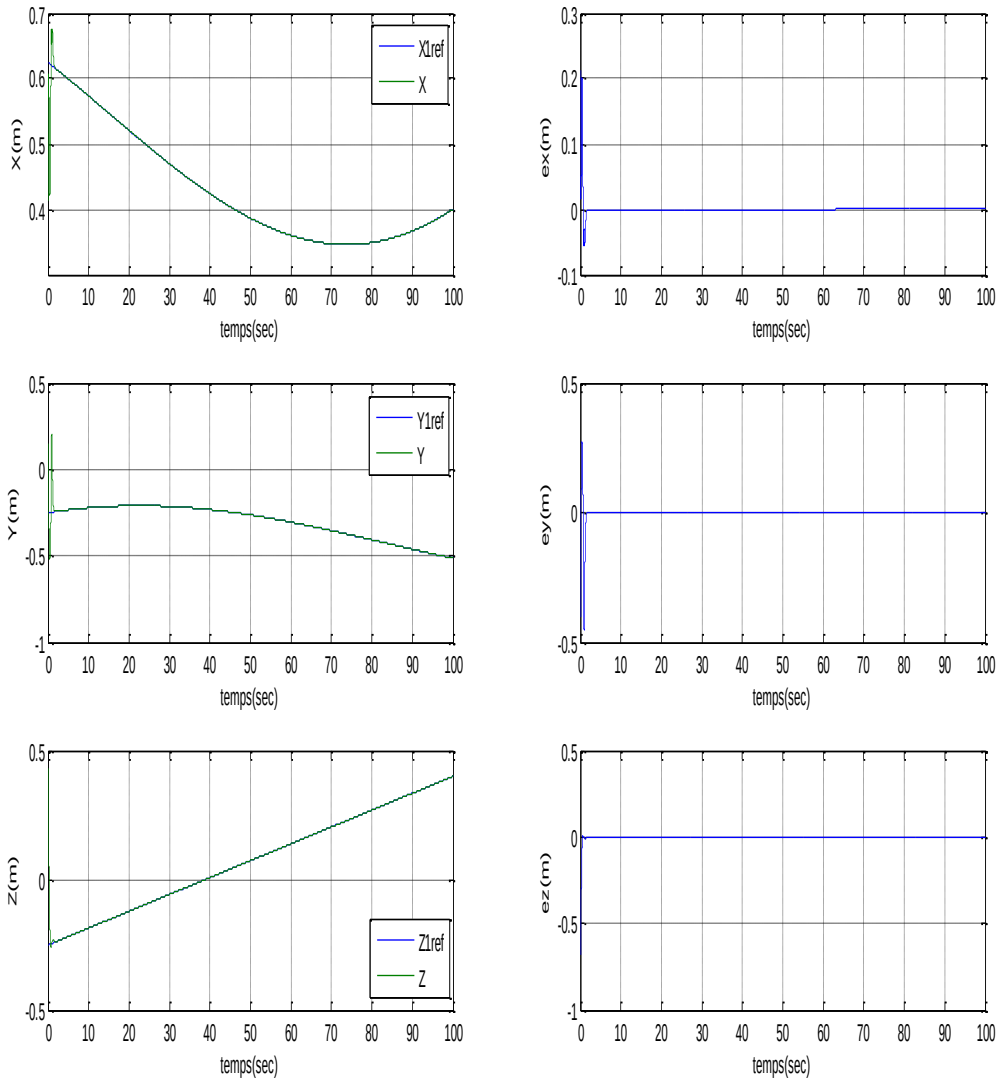
Figure III.11 : représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace tridimensionnel.

Les résultats de simulation montrent clairement l'inconvénient majeur de la loi de commande linéarisante classique qui est la sensibilité de cette stratégie de commande aux effets des perturbations d'origines internes ou externes. Les figures III.9 et III.10 montrent la divergence des trajectoires du système des trajectoires désirées sous l'effet des perturbations.

<u>Résultats du Teste3 :</u> Commande linéarisante robuste appliquée pour la commande du modèle perturbé

Afin d'améliorer la loi de commande linéarisante classique du point de vue robustesse face aux perturbations d'origines interne ou externes, la loi de commande linéarisante robuste proposée dans ce projet est appliquée dans ce teste pour la commande du robot manipulateur.

Le caractère robuste est introduit par le terme de commande à rejet actif de perturbation chargé d'estimer et de compenser en temps réel les effets des perturbations.

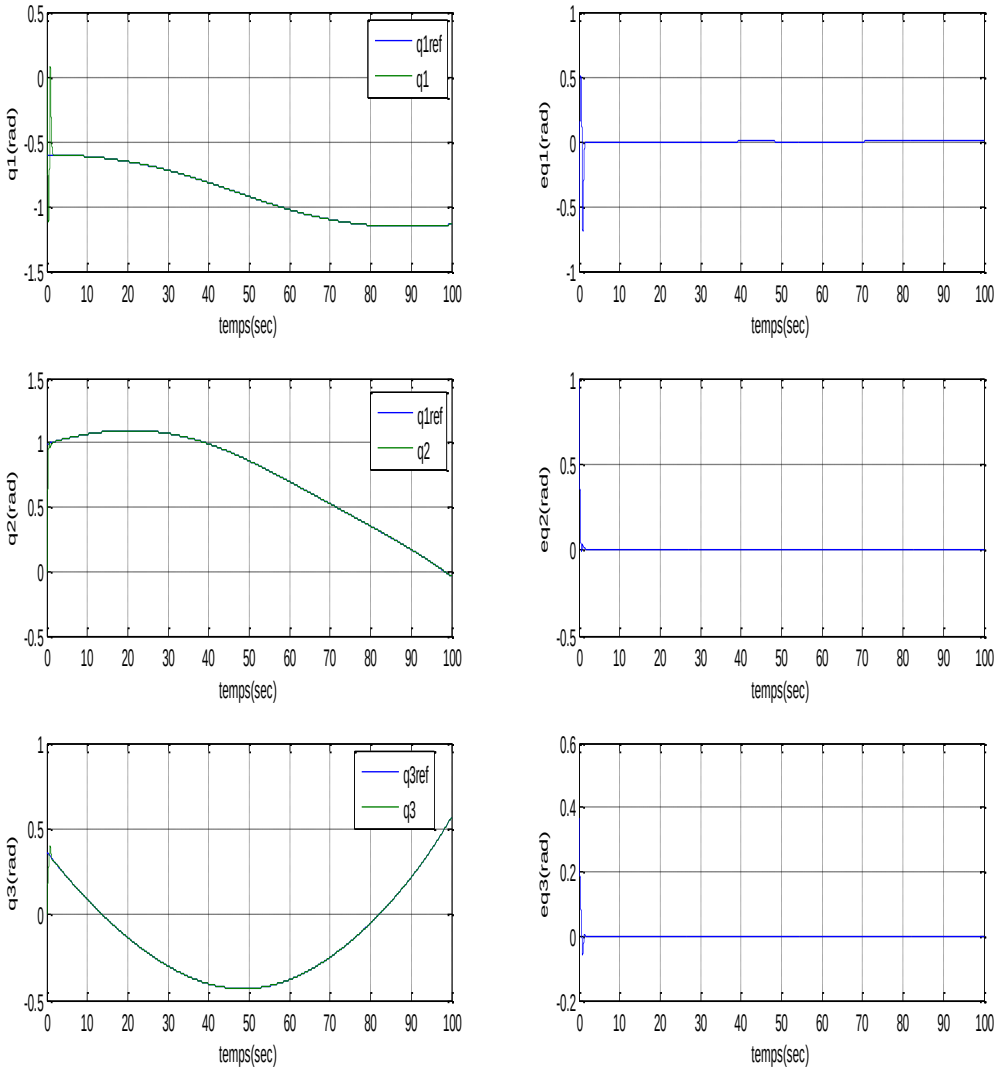


(a) (b)

Figure III.12 : Résultats de simulation dans l'espace opérationnel.

a) Positions *x*, *y*, *z* de l'organe terminal.

b) erreurs de poursuite.



(a) (b)

Figure III.13 : Résultats de simulation dans l'espace articulaire.

a) Variables articulaires *q1*, *q2*, *q3* des trois articulations du manipulateur.

b) Erreurs de poursuite.

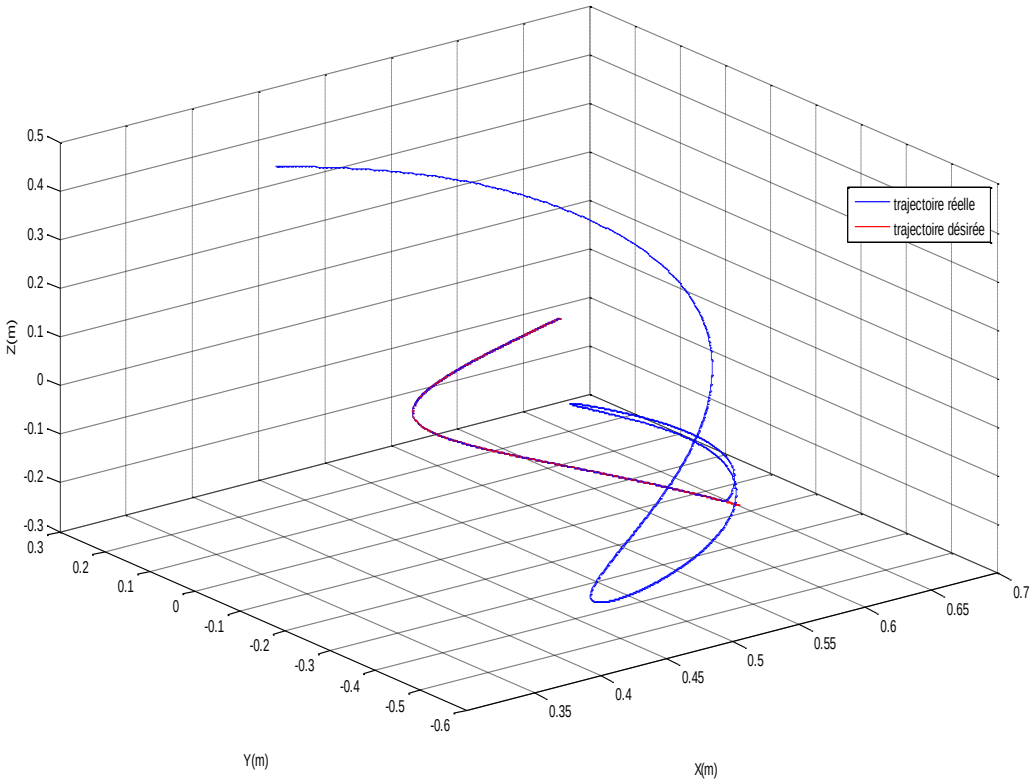


Figure III.14 : représentation la trajectoire réelle et la trajectoire désirée dans l'espace tridimensionnel.

Comme attendu, les résultats ainsi obtenus montrent clairement le caractère robuste de la commande linéarisante robuste grâce au terme à rejet actif de perturbation (ADRC), ou les figures III.12, II.13 et III.14 montrent la convergence des sorties du système vers les trajectoires désirées. Cette robustesse face aux effets des perturbations et des erreurs de modélisation augmente la possibilité de la réussite de cette loi de commande dans le cas d'une réalisation pratique sur le système réel.

III.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, avons présenté la loi de commande linéarisante robuste proposée, avec une application pour le contrôle de position de l'organe terminal d'un robot manipulateur PUMA 560. Où après avoir compenser les termes non linéaires du modèle par un retour d'état non linéaire, le contrôle de position des trois articulations a été réalisé par des correcteurs linéaires classiques (imposition de la dynamique d'élimination de l'erreur par placement de pôles). Pour assurer la robustesse de cette loi de commande classique, un terme à rejet actif de perturbation qui a pour rôle d'estimer et de réduire (compenser) les effets des perturbations externes (masse de la charge manipulée) et internes (incertitudes paramétrique).

Les résultats obtenus en simulation montrent clairement les bonnes qualités de la loi de commande proposée soit qu'en mode de poursuite soit qu'en mode de régulation (rejet de perturbations).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les robots manipulateurs PUMA sont largement utilisés dans les procédés industriels. Dans ce sujet la commande linéarisante entrées-sorties sera appliquée pour la commande de position d'un robot manipulateur de type PUMA à trois degrés de liberté avec la prise en compte de la dynamique des actionneurs. Le modèle dynamique décrivant le comportement du manipulateur est constitué d'un système équations différentielles non linéaires du deuxième ordre fortement couplé. Dans l'industrie, les lois de commande linéaires développées à base des modèles linéaires approchés des manipulateurs sont souvent utilisées en raison de la simplicité de leurs algorithmes de synthèse. Cependant, les non-linéarités dans les systèmes réels empêchent parfois ces techniques de contrôle linéaires d'atteindre les performances requises.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la conception d'une la loi de commande linéarisante robuste applique pour le contrôle de position de l'organe terminal du bras manipulateur structure ouverte simple trois degrés de liberté de type PUMA 560. Pour atteindre l'objectif fixé initialement nous avons procédé comme suit :

En premier lieu, un rappel de terminologie fondamentale de robotique est donnée (définition de la robotique, structures articulées des robots manipulateurs, articulations, degré de liberté, les actionneurs, types de poignets, types de porteurs, etc…) nécessaire à la compréhension des notions de robotique.

En second lieu, on a abordé les la modélisation du robot manipulateur dans l'espace opérationnel. Cette modélisation résulte de l'association des modèles géométrique, cinématique et dynamique et de natures différentiel et algébrique, alors le modèle mathématique globale est définit par un système algébrico-différentiel extrêmement non linéaire et couplé. Une fois le modèle qui gouverne le comportement du système établit, on pouvait alors passer vers la tache de commande.

L'application de la commande linéarisante entrées-sorties au troisième chapitre, nous a permet de résoudre cette difficulté en transformant ce système MIMO (multi-entrées/ multi-sorties) extrêmement non linéaire en série de systèmes linéaire mono-variables (SISO) entièrement découplées les uns des autres grâce à un retour d'état non linéaire. Le suivi des trajectoires de référence (altitude et angle de lacet désirées) à été assuré par des contrôleurs

linéaires classiques. Cependant l'inconvénient majeur de cette loi de commande est la sensibilité aux effets des perturbations d'origines internes ou externes.

Afin de se débarrasser de cet inconvénient qui limite l'utilisation de cette technique dans les applications réelles, et d'améliorer la robustesse de cette méthode de commande, nous avons introduit un terme de rejet actif de perturbation (Actif Disturbance Rejection Control) charger d'estimer de rejeter les effets des imprécisions du modèle et des perturbations au moyen d'un estimateur à état étendu (Extended State Observer) ou les perturbations globales agissant sur le système sont considérés comme un état supplémentaire. Les résultats ainsi obtenus en simulation numérique ont été très satisfaisantes soit du point de vue performances de poursuite ou du point de vue régulation (rejet de perturbations).

Enfin, une conclusion générale récapitulant le travail réaliser dans ce projet de fin d'études est donnée.

Annexe

1. Paramètres réels de la dynamique d'un robot PUMA 560

Parties	Poids (kg)
Liaison 1	-
Liaison 2	17.40
Liaison 3	4.80
Liaison 3 avec poignet	6.04

Tableau Annexe I.1 : Poids des déférentes liaisons *(kg : ± 0.01+1%).*

Parties	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{moteur}
Liaison 1	-	-	0.35	1.14 (± 0.27)
Liaison 2	0.130 (±3%)	0.524 (±5%)	0.539 (±3%)	4.71 (±0.54
Liaison 2	0.066	0.0125	0.086	0.83 (±0.09
Avec Poignet	0.192 (±4%)	0.0154 (±5%)	0.212 (±4%)	-

Tableau Annexe I.2 : Paramètre d'inertie ($kg.m^2$).

Numéro de l'articulation	1	2	3
Rapport d'engrenage	62.61	107.36	53.69
Couple Maximum [N.m]	97.6	180.4	89.4

Tableau annexe I.3 : paramètres des actionneurs parte mécanique.

Moteur	$R\ (\Omega)$	$L(\Omega^{-1})$	K_e	K_T
1	3.9	0.0048	0.12	0.09
2	3.9	0.0048	0.12	0.09
3	1.6	0.0039	0.19	0.06

Tableau annexe I.4 : paramètres des actionneurs parte électrique.

2. Programme de l'espace de travail dans modèle MGD

```
function  P=MGD (u)
q1=u (1);
q2=u (2);
q3=u (3);
a2=0.4318;
a3=-0.0203;
d2=0.2435;
d3=-0.0934;
d4=0.4331;
P (1) =cos (q1) * (a3*cos (q2+q3) +d4*sin (q2+q3) +a2*cos (q2))-(d2+d3)*sin (q1);
P (2) =sin (q1) *(a3*cos (q2+q3) +d4*sin (q2+q3) +a2*cos (q2)) + (d2+d3)*cos (q1);
P 3) =-a3*sin (q2+q3) +d4*cos (q2+q3)-a2*sin (q2);
```

Bibliographique

Bibliographie

[1] A. Islam, "développement d'un robot joueur d'échecs", rapport de projet de fin d'études, Académie Militaire de Tunisie, 2009.

[2] M. Chaal, "Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaine continue ouverte", mémoire de master professionnel, UKM Ouargla 2013.

[3] E. Dombre, "Analyse et Modélisation des Robots Manipulateurs", 22 janvier 2002.

[4] R. Gourdeau, "Modélisation des Robots Manipulateurs, Département de génie électrique", Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010.

[5] J. L. Boimond, "robotique istia", Université Angers.

[6] J. Qin, "Commande hybride position/force robuste d'un robot manipulateur utilisée en usinage et/ou en soudage", livre, Arts et Métiers Paris Tech, 2013. France.

[7] M. Mokhtari, S. Fergani, "Modélisation et conception d'un robot SCARA à l'aide de logiciels", Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique Algérie 2010.

[8] J. Gangloff, "Cours de Robotique ENSPS 3A", Master ISTI.

[9] J. Hansen, « Modélisation et Commande d'un robot LEGO UJF», Master PSPI, 2008-2009.

[10] DJ. Fadhila, "étude et conception d'un robot manipulateur pour l'enmtp", mémoire de magister, Université Hadj–Lakhdar Batna 2012.

[11] B. Daoudi, S. Dahmani, "commande par mode de glissement d'un robot manipulateur série a trois liaisons rotatives", mémoire de master université Dr. yahia fares de Médéa 2014.

[12] C. Azira, I. Gacemi, "commande linéarisante entrées-sorties d'un modèle de bras manipulateur de type SCARA", mémoire de master université Dr. yahia fares de Médéa 2014.

[13] B. BAYLE, "Introduction `a la Robotique", 2004–2005.

[14] W. Khalil, E. Dombre, "Modélisation identification et commande des robot", livre 2ème édition, Hermes Science Publication, Paris, 1999.

[15] W. Khalil, E. Dombre, "Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators", ISTE Ltd, 2007.

[16] C. D. Crane, J. Duffy, "Kinematic analysis of robot manipulators", Cambridge University Press, 1998.

[17] R. Merzouki, "cours robotique industrielle", institut polytechnique de Lille, France, 2010-2011.

[18] B. Armstrong, O. Khatib et J. Burdick, "The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm", IEEE, 1986.

[19] A. Guendouzi, A. Boubakir et M. Hamerlain, "Higher Order Sliding Mode Control of Robot Manipulator", ICAS 2013: The Ninth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems.

[20] R. Mebarki, "Commande du Robot PUMA 560 en Force/Position par la Méthode de L'Impédance» Ecole Nationale Polytechnique Algérien", mémoire d'ingénieur d'état, 2005.

[21] A. Isidori, "Nonlinear Control Systems", 3eme edition Springer-Verlag 1995.

[22] Q. Lu, Y. Sun, and S. Mei, "Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics", Kluwer Academic Publishers 2001.

[23] Y. Bendaha, B. Mazari, et M. Chebre, "Commande Adaptative Linéarisante par Géométrie Différentielle d'un Moteur Asynchrone", Acta Electrotehnica, Vol. 53, Number 2, pp. 115-120, 2012.

[24] A. Bentaallah, A. Meroufel, A. Massoum, A. Bendaoud, et K. Medles "Commande Non Linéaire d'une Machine Asynchrone sans Capteur Mécanique avec Observateur du Flux Rotorique par Mode Glissant ", Acta Electrotehnica, Vol. 48, Number 1, pp. 3-9, 2007.

[25] S. Liu, X. Mei, F. Kong, "Research on Unwinding Tension System Control Based on Active Disturbance Rejection Control", 2nd International Conference on Materials, Mechatronics and Automation, pp. 252-257, 2012.

[26] J. Zhang, J. Feng, Y. Zhou, F. Fang and H. Yue, "Linear Active Disturbance Rejection Control of Waste Heat Recovery Systems with Organic Rankine Cycles", Energies, Vol. 5, pp. 5111-5125, 2012.

[27] Z. Gao, "Active Disturbance Rejection Control: A Paradigm Shift in Feedback Control System Design", Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 2399-2405, 2006.

[28] Q. Zheng, L. Q. Gao, Z. Gao, "On Stability Analysis of Active Disturbance Rejection Control for Nonlinear Time-Varying Plants with Unknown Dynamics", Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control New Orleans, LA, USA,pp 3501-3506, 2007.

[29] J. Han From, "PID to Active Disturbance Rejection Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, pp. 900-906, 2009.

[30] Q. Zheng, L. Q. Gao, Z. Gao, "On Estimation of Plant Dynamics and Disturbance from Input-Output Data in Real Time", 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control Singapore, pp.1167-1172, 2007.

[31] X. Yang, Y. Huang, "Capabilities of Extended State Observer for Estimating Uncertainties", 2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, pp. 3700-3705, 2009.