



Faculté des sciences et des sciences appliquées

Département de Génie électrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN ELECTROMECHANIQUE ET SYSTEMES DE COMMANDE

Thème

**Modélisation et commande d'un robot manipulateur à
3 degrés de liberté de type SCARA**

Présenté par :

- TALEB Houssef Eddine
- SIFODIL Zakaria

Encadré par :

Mr. DJEBIRI Mustapha

Soutenu le : 27/06/2016

Devant le jury composé de :

Président de jury : KIRACHE Nora

Examineur 1 : RAHICHE Abderrahmane

Examineur2 : BENZAOUI Amir

Promotion juin 2016

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la force, la santé et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien, pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements :

*À notre encadreur Mr. **DJEBIRI**,*

*Au chef du département Mr. **NOURINE**,*

Aux membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail

Nous remercions enfin tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail surtout à :

✚ Ma famille :

- Mes très chers parents
- Mon frère et mes sœurs
- Mes oncles et mes cousins

✚ A tous mes amis avec qui j'ai passé ces années d'études et mes camarades du groupe

HOUSSEM EDDINE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ✚ À ceux qui m'ont donné sans rien me demander, mes très chers parents
- ✚ À mes frères
- ✚ À tous les membres de ma grande famille
- ✚ À mes très chères collègues

ZAKARIA

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

I.1. Introduction.....	3
I.2.Généralités sur les robots.....	3
I.2.1.Définition.....	3
I.2.2 Eléments constitutifs d'un robot manipulateur.....	4
I.2.3classification des robots manipulateurs	6
I.3. Présentation du robot utilisée.....	8
I.4. Modèle géométrique.....	9
I.4.1. Modèle géométrique directe (MGD).....	9
I.4.2. Modélisation géométrique inverse (MGI)	9
I.5. Modèle cinématique.....	11
I.5.1 Modèle cinématique directe (MCD).....	11
I.5.2 Modèle cinématique inverse (MCI)	11
I.6.Génération des trajectoires.....	12
I.7. Modèle dynamique.....	12
I.8 Résultats de simulation.....	15
I.9. Conclusion.....	17

Chapitre II

II.1. Introduction.....	18
II.2. Régulation automatique.....	18
II.2.1. Définition.....	18

II.2.2. But de la régulation automatique.....	19
II.2.3. Les différents types de régulateurs.....	19
II.3. Régulateur Proportionnel Intégrateur Dérivé PID.....	22
II.3.1.Principe général.....	22
II.3.2. Réglages du PID.....	22
II.3.3. Structures des régulateurs PID électroniques.....	25
II.4. Commande par régulateur PID des robots manipulateurs.....	26
II.5. Résultats de simulation.....	26
II.6 Conclusion.....	32
 Chapitre III 	
III.1. Introduction.....	33
III.2. Principe de la commande adaptative.....	34
III.3. Différents types de commande adaptative.....	34
III.3.1. Commande adaptative a gain programmé.....	34
III.3.2. Commande adaptative à correcteur auto-ajustable.....	35
III.3.3. commande adaptative à modèle de référence (CAMR).....	35
III.4. Commande adaptative des robots manipulateurs.....	36
III.5. Commande adaptative décentralisée.....	37
III.6. Résultats de simulation.....	39
III.7. Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43
Références bibliographiques.....	44

Liste des figures

Figure I.1 Eléments constitutifs d'un robot manipulateur.....	4
Figure I.2 Structure cartésienne et son espace de travail.....	6
Figure I.3 Structure cylindrique et son espace de travail.....	6
Figure I.4 Structure sphérique et son espace de travail.....	7
Figure I.5 Structure SCARA et son espace de travail.....	7
Figure I.6 Structure anthropomorphe et son espace de travail.....	8
Figure I.7 Schéma du robot SCARA à 3 d.d.l. (RRP).....	8
Figure I.8 Vue de face et d'en haut du robot SCARA.....	9
Figure I.9 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 1.....	15
Figure I.10 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 2.....	16
Figure I.11 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 3.....	16
Figure II.1 Schéma de principe de régulation automatique.....	19
Figure II.2 Schéma fonctionnel du régulateur P.....	19
Figure II.3 Schéma fonctionnel du régulateur I.....	20
Figure II.4 Schéma fonctionnel du régulateur PI.....	21
Figure II.5 Schéma fonctionnel du régulateur PD.....	22
Figure II.6 La réponse type d'un procédé stable.....	23
Figure II.7 Structure parallèle du PID.....	25
Figure II.8 Structure mixte du PID.....	25
Figure II.9 Structure série du PID.....	25
Figure II.10 Schéma classique de la commande PID d'un robot manipulateur.....	26
Figure II.11. a) Commande par régulateur P ($K_{p1}=50$; $K_{p2} = 50$; $K_{p3} = 500$).....	27

Figure II.11. b) Commande par régulateur P ($K_{p1}=500$; $K_{p2} = 500$; $K_{p3} = 5000$).....	27
Figure II.11.c) Commande par régulateur P ($K_{p1}=10000$; $K_{p2} = 1000$; $K_{p3} = 10000$).....	28
Figure II.11.d) Commande par régulateur P ($K_{p1}=2000$; $K_{p2} = 2000$; $K_{p3} = 20000$).....	28
Figure II.12 Commande par régulateur PID.....	30
Figure II.13 Commande par régulateur PID avec couple résistant à l'instant $t=2s$	31
Figure II.14 Commande par régulateur PID avec variation paramétrique à l'instant $t=2s$	31
Figure III.1 Principe des systèmes de commande adaptative.....	34
Figure III.2 Commande adaptative à gain préprogrammé.....	35
Figure III.3 Commande adaptative à correcteur auto-ajustable.....	35
Figure III.4 Commande adaptative à modèle de référence.....	36
Figure III.5 Schéma de la commande adaptative décentralisée pour le sous-système i.....	37
Figure III.6 Résultats de la Commande adaptative décentralisée.....	40
Figure III.7 Commande adaptative décentralisée avec couple résistant à l'instant $t = 2s$	41
Figure III.8 Commande adaptative décentralisée avec variation paramétrique à l'instant $t = 2s$	41

Introduction générale

L'utilisation des manipulateurs robotiques dans diverses applications est motivée par les besoins et les demandes en automatisation et les besoins industriels. Le contrôle des systèmes mécaniques, plus particulièrement les manipulateurs robotiques, est un domaine actif de la recherche appliquée. L'implantation de robots dans des ateliers, a mis en évidence différents problèmes liés à l'utilisation et à la gestion des sites robotisés, dont le manipulateur est l'un des composants. Afin de contribuer à la résolution et à la maîtrise de ces derniers, différents outils ont été développés dont l'objectif est d'apporter une aide à l'utilisateur ou au concepteur pour résoudre les problèmes qui se posent lors des différentes phases du travail, et qui concernent par exemple, le choix du robot en fonction des tâches visées, l'implantation de celui-ci dans un site et les méthodes de programmation.

La recherche dans le domaine de la robotique peut-être subdivisée en deux parties essentielles : la modélisation et la commande. Plusieurs méthodes de modélisation et diverses techniques de commande ont été étudiées jusqu'à présent. Dans le but de développer des lois de commande performantes et d'atteindre les objectifs demandées, il faut commencer par construire des modèles mathématiques précis.

La commande des robots manipulateurs constitue l'une des principales préoccupations de la recherche en robotique. Ceci est dû à la difficulté de commander un robot auquel on demande d'exécuter des tâches aussi bien précises que diversifiées. Cette précision est plus difficile à obtenir si la vitesse d'évolution augmente. En effet, la présence des couplages entre les liaisons complique la conception de la commande. De nombreuses méthodes de commande classiques et modernes existent avec lesquelles de bons régulateurs peuvent être conçus si les paramètres étaient considérés fixes et connus. Cependant, la variation des paramètres du système dû aux changements des conditions du travail sollicitent lois de commande modernes utilisant des gains variables.

Les différentes études effectuées dans ce domaine concernent diverses méthodes de commande, telles que la commande classique de contrôle: régulateur proportionnel intégrateur dérivateur (PID), D'autres méthodes modernes sont de même appliquées telles que, la commande décentralisée qui considère un système complexe comme ensembles des sous systèmes interconnectés chaque sous système sera commandé par une station de commande n'ayant accès qu'aux informations locales. Dans tous ces cas, le développement d'un modèle mathématique précis et efficace est nécessaire.

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation et la commande d'un robot manipulateur à 3 degrés de liberté.

Le travail réalisé et présenté dans ce mémoire s'articule sur trois (03) chapitres :

Dans le premier chapitre, et après avoir donné quelques notions de base sur les robots manipulateurs, le robot utilisé sera présenté et les différents modèles qui le caractérise seront définis et élaborés (modèles cinématique, géométrique et dynamique).

L'objectif du deuxième chapitre est l'étude et la synthèse d'un régulateur classique de type PID qui sera utilisé pour commander le robot.

Dans le troisième chapitre, une technique de commande adaptative sera présentée puis appliquée au robot.

Des résultats de simulation seront présentés à la fin de chaque chapitre afin d'évaluer les performances des techniques de commandes utilisées.

Enfin, on termine ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Modélisation du robot

I.1. Introduction

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

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

Dans le domaine de la robotique l'élaboration du modèle nécessite une étude approfondie et détaillée sur la structure du robot.

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

I.2. Généralités sur les robots

I.2.1. Définition

Pour le sens commun, un robot est un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets ou la locomotion dans le but de se substituer à l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles [Vibet, 87].

Plusieurs autres définitions ont été proposées pour qualifier un robot, parmi lesquelles on peut citer [Guenfaf, 95] :

1- Définition du Petit Larousse : « un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable ».

2- Définition de la JIRA (Japan Industrial Robot Association) : « c'est un système versatile doté d'une mémoire et pouvant effectuer des mouvements comme ceux d'un opérateur humain »

3- Définition de la RIA (Robot Institute of America) : « Un robot est un manipulateur reprogrammable à fonctions multiples. Il est conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des

outils ou des instruments spécialisés suivant des trajectoires variables programmées, en vue d'accomplir des tâches très diverses »

I.2.1 Eléments constitutifs d'un robot manipulateur [Chaal, 13] [Djebiri, 97]

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

Un robot manipulateur est généralement constitué des parties suivantes :

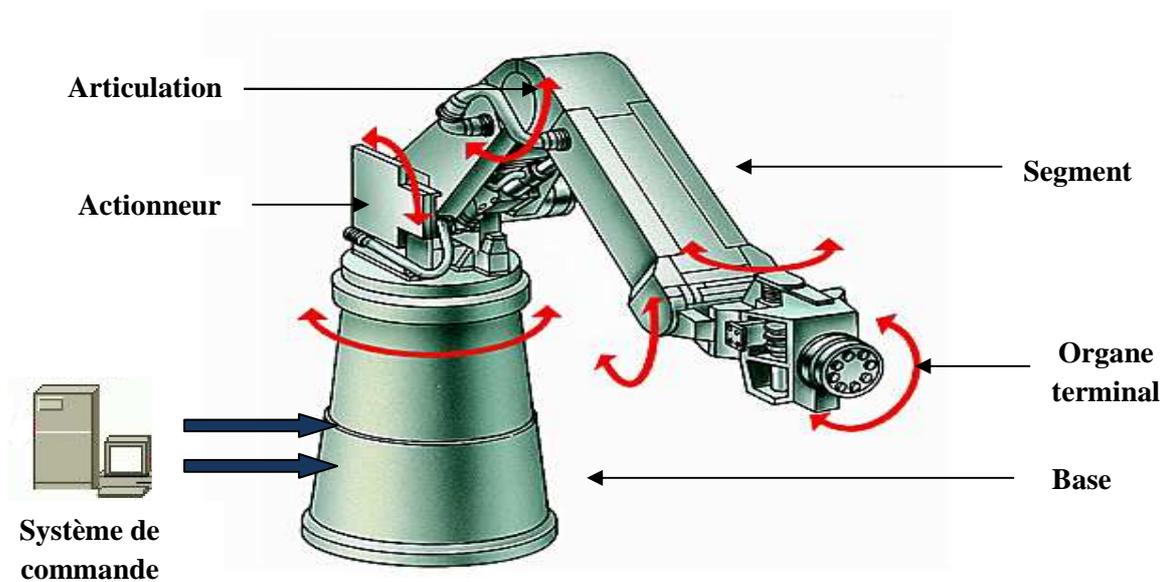


Figure I.1 Eléments constitutifs d'un robot manipulateur

▪ La base

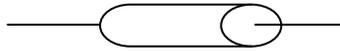
La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

▪ Le porteur

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

- Segments : corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres.
- Articulations : Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre. On distingue, généralement, deux types d'articulations, rotoïde et prismatique.

- ✓ Articulation rotoïde : Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe. Ce type d'articulation est schématisé par un cylindre



- ✓ Articulation prismatique : Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe. Ce type d'articulation est schématisé par un parallélogramme



▪ Les actionneurs

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

▪ Les capteurs

Ils peuvent fournir des informations sur l'état mécanique robots (capteurs proprioceptifs) comme ils peuvent fournir des informations sur l'environnement du robot (capteurs extéroceptifs). Ces informations sont nécessaires pour la commande du robot.

Ils peuvent être des capteurs de position, vitesse, accélération, force, caméra...etc.

▪ L'organe terminal

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

▪ Le système de commande

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

I.4.2 Classification des robots manipulateurs [Paul, 81] [Sciavicco, 02] [Siciliano, 10]

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

▪ Structure cartésienne (PPP) :

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

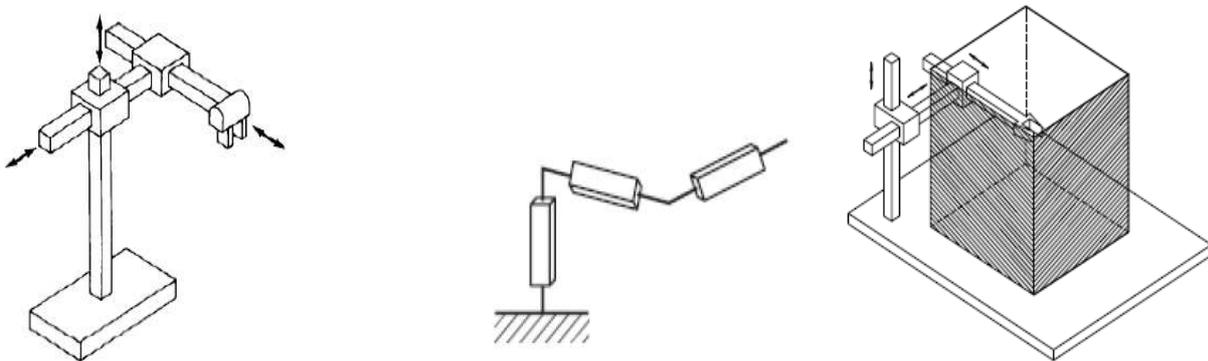


Figure I.2 Structure cartésienne et son espace de travail

▪ La structure cylindrique (RPP) ou (PRP) :

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

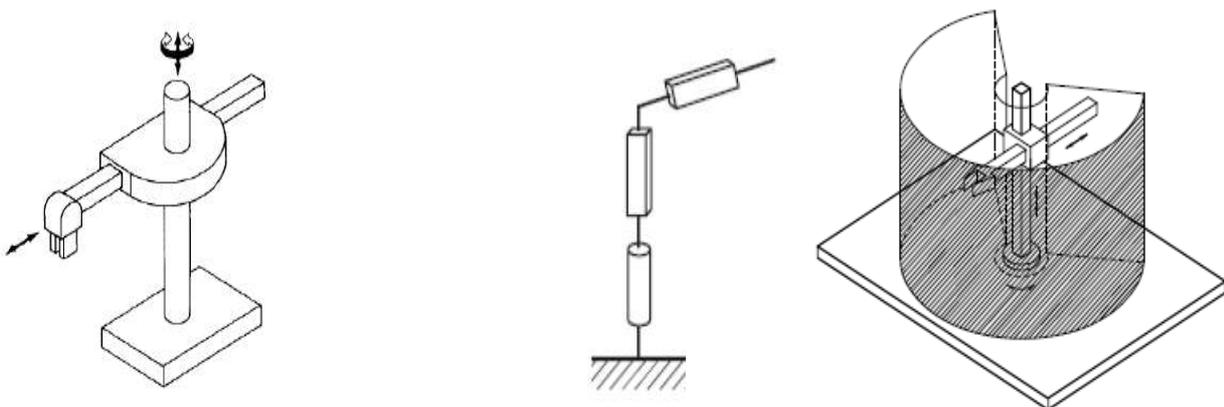


Figure I.3 Structure cylindrique et son espace de travail

- **La structure sphérique ou polaire à axes de rotation orthogonaux :**

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

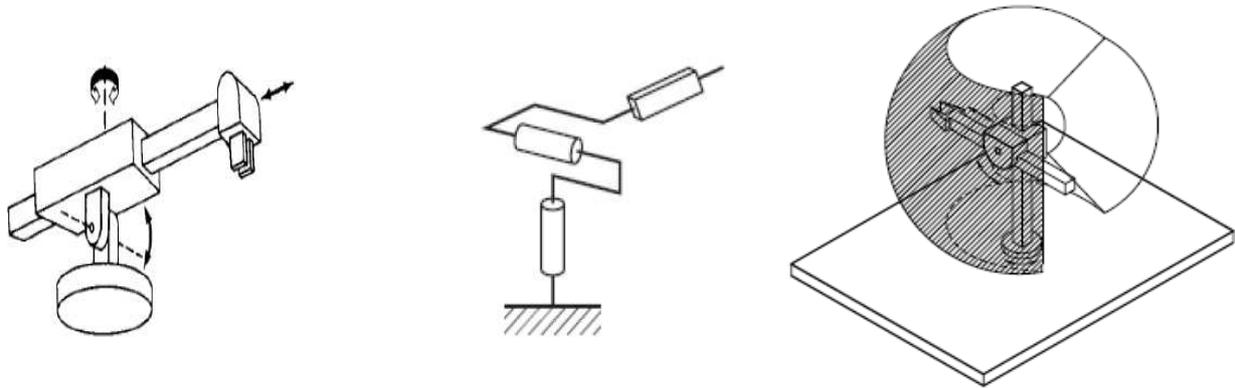


Figure I.4 Structure sphérique et son espace de travail

- **La structure dite SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) :**

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

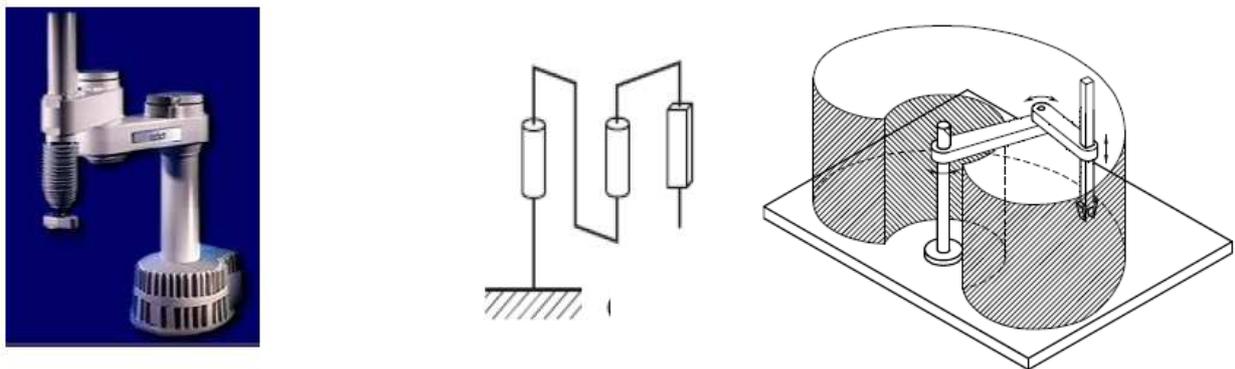


Figure I.5 Structure SCARA et son espace de travail

- **La structure 3R (anthropomorphe) :**

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

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

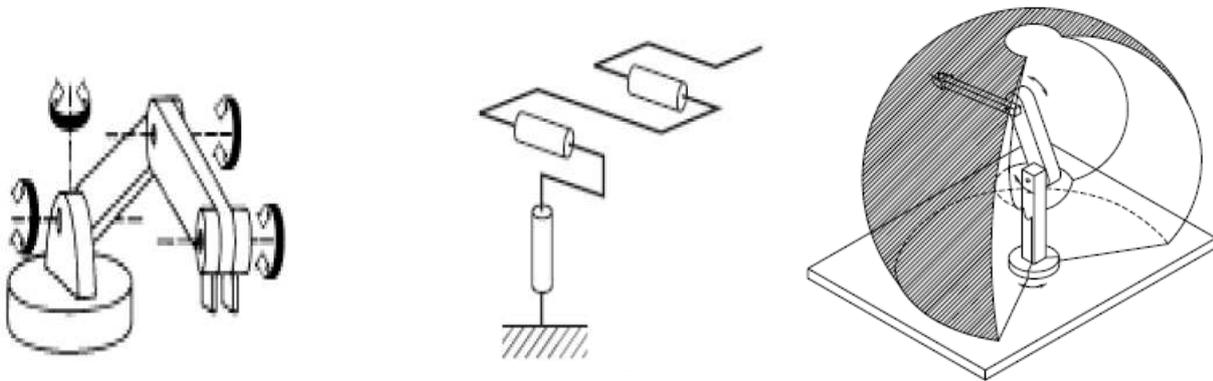


Figure I.6 Structure anthropomorphe et son espace de travail

I.3. Présentation du robot utilisée

Le robot auquel on s'intéresse dans notre étude est un robot à 3 degrés de liberté de type SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Il est caractérisé par deux articulations rotationnelles d'angles de rotations ϑ_1 et ϑ_2 par rapport à 2 axes verticaux et parallèles, et une articulation translationnelle de déplacement d_3 le long d'un axe vertical.

La position de l'organe terminal est complètement déterminée en utilisant ses trois coordonnées dans l'espace (x, y, z) qui sont dites *coordonnées opérationnelles*. La configuration du robot est déterminée en utilisant les angles $(\vartheta_1, \vartheta_2)$ et le déplacement d_3 qui sont dites *coordonnées généralisées ou articulaires*.

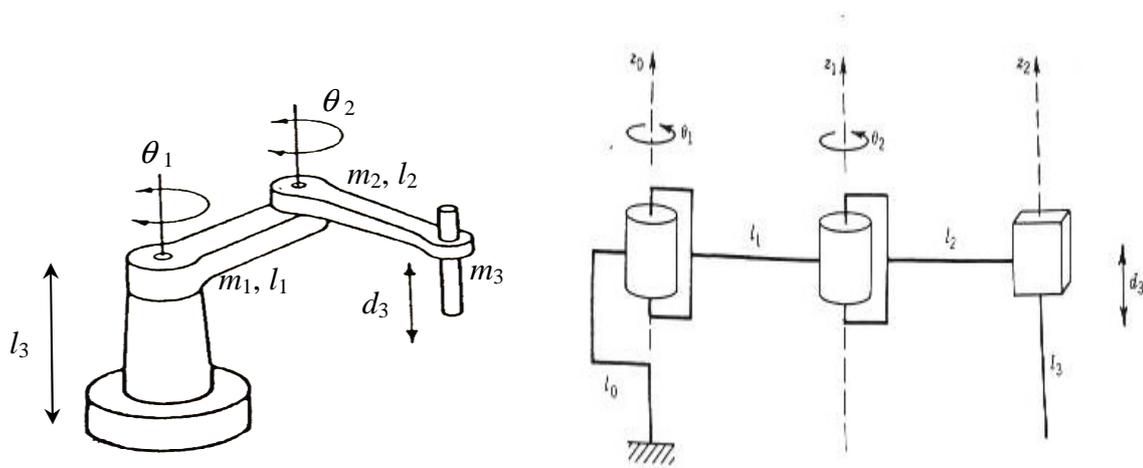


Figure I.7 Schéma du robot SCARA à 3 d.d.l. (RRP)

I.4. Modèle géométrique [Paul, 81] [Sciavicco, 02] [Siciliano, 10]

Il est plus naturel, pour un robot, de connaître la situation de son organe terminal plutôt que de considérer la variation de sa configuration. Mais étant donné que les commandes des asservissements des robots agissent sur les grandeurs articulaires, qui définissent la configuration, il est donc nécessaire d'établir une transformation géométrique reliant les variables articulaires q_i et les coordonnées absolues de l'organe terminal x_i (coordonnées opérationnelles).

I.4.1 Modèle géométrique directe (MGD)

Le modèle géométrique direct d'un robot permet de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires sous la forme :

$$X = F(q) \tag{I.1}$$

Ou $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ vecteur des coordonnées opérationnelles.

$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ vecteur des coordonnées généralisées.

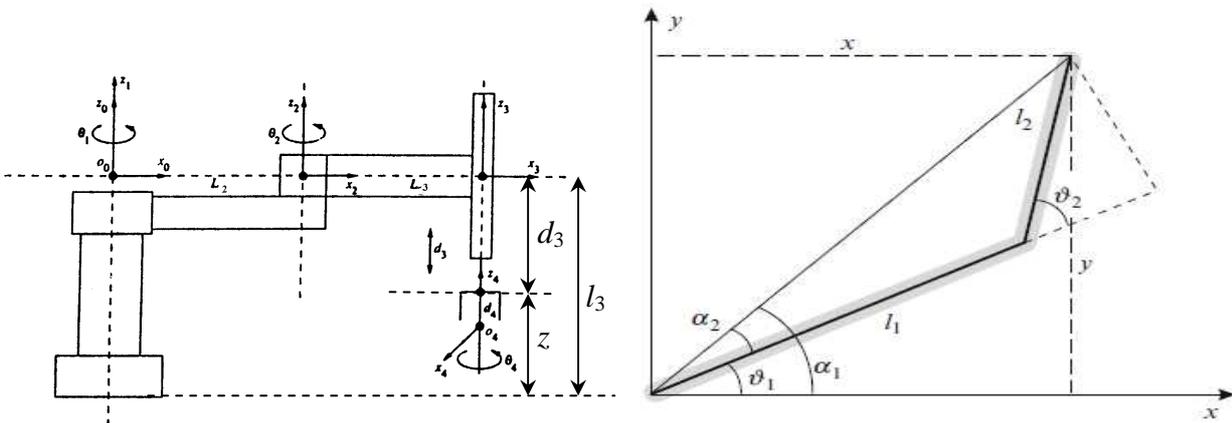


Figure I.8 Vue de face et d'en haut du robot SCARA

Dans le cas du robot SCARA, et d'après la figure I.8, le modèle géométrique direct est donné par :

$$\begin{cases} x = l_1 \cos(\vartheta_1) + l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) \\ y = l_1 \sin(\vartheta_1) + l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) \\ z = l_3 - d_3 \end{cases} \tag{I.2}$$

I.4.2 Modélisation géométrique inverse (MGI)

Le modèle géométrique inverse consiste à trouver le système d'équations qui exprime les coordonnées généralisées en fonction des coordonnées opérationnelles.

$$q = F^{-1}(X) \tag{I.3}$$

Dans le cas du robot SCARA, la détermination du MGI se fait en 2 étapes.

Etape 1 : Calcul de l'angle ϑ_2

A partir du système I.2, on obtient

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2\cos(\vartheta_2)$$

Donc on aura

$$\cos(\vartheta_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

D'où

$$\vartheta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

Néanmoins, il sera convenable d'exprimer ϑ_2 sous une autre forme. On pose

$$a = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

On aura

$$\begin{cases} \cos(\vartheta_2) = a \\ \sin(\vartheta_2) = \pm\sqrt{1-a^2} \end{cases} \Rightarrow \tan(\vartheta_2) = \frac{\pm\sqrt{1-a^2}}{a} \Rightarrow \vartheta_2 = \pm\arctan\left(\frac{\sqrt{1-a^2}}{a}\right)$$

Ceci traduit le fait que pour une position donnée de l'organe terminal le robot peut avoir deux configurations possibles.

Etape 2 : Calcul de l'angle ϑ_1

D'après la figure I.8, on remarque que $\vartheta_1 = \alpha_1 - \alpha_2$

$$\text{avec } \begin{cases} \tan(\alpha_1) = \frac{y}{x} & \Rightarrow \alpha_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ \tan(\alpha_2) = \frac{l_2\sin(\vartheta_2)}{l_1+l_2\cos(\vartheta_2)} & \Rightarrow \alpha_2 = \arctan\left(\frac{l_2\sin(\vartheta_2)}{l_1+l_2\cos(\vartheta_2)}\right) \end{cases}$$

Donc

$$\vartheta_1 = \alpha_1 - \alpha_2 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2\sin(\vartheta_2)}{l_1 + l_2\cos(\vartheta_2)}\right)$$

On obtient finalement le MGI

$$\begin{cases} \vartheta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2\sin(\vartheta_2)}{l_1+l_2\cos(\vartheta_2)}\right) \\ \vartheta_2 = \pm\arctan\left(\frac{\sqrt{1-a^2}}{a}\right) \text{ avec } a = \frac{x^2+y^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2} \\ d_3 = l_3 - z \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

I.5 Modèle cinématique

La modélisation cinématique complète la modélisation géométrique en établissant la relation entre les dérivées des coordonnées articulaires (vitesses articulaires ou vitesses des liaisons) et les dérivées des coordonnées opérationnelles (vitesses opérationnelles ou vitesses de l'organe terminal)

I.5.1 Modèle cinématique directe (MCD)

Le modèle cinématique direct (MCD) d'un robot manipulateur décrit les vitesses opérationnelles en fonction des vitesses articulaires. Il est noté

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (I.5)$$

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

Le calcul de la matrice jacobienne se fait en dérivant le système (I.1)

$$J(q) = [J_{ij}]_{i=\overline{1,m}; j=\overline{1,n}} \quad \text{avec} \quad J_{ij} = \frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j}$$

Dans notre cas

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \vartheta_1} & \frac{\partial x}{\partial \vartheta_2} & \frac{\partial x}{\partial d_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \vartheta_1} & \frac{\partial y}{\partial \vartheta_2} & \frac{\partial y}{\partial d_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \vartheta_1} & \frac{\partial z}{\partial \vartheta_2} & \frac{\partial z}{\partial d_3} \end{pmatrix}$$

Ce qui donne le MCD suivant

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin(\vartheta_1) - l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & -l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ l_1 \cos(\vartheta_1) + l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} \quad (I.6)$$

I.5.2 Modèle cinématique inverse (MCI)

Le but de ce modèle consiste à trouver les vitesses articulaires qui génèrent la vitesse désirée du point terminal. Sa détermination consiste à inverser la matrice Jacobéenne, qui n'est pas toujours possible. Le modèle cinématique inverse est de la forme :

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{X} \quad (I.7)$$

Pour le robot SCARA utilisé, nous obtenons après calcul :

$$\begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \\ \dot{d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ -l_1 \cos(\vartheta_1) - l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & -l_1 \sin(\vartheta_1) - l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ 0 & 0 & l_1 l_2 \sin \vartheta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \quad (I.8)$$

I.6. Génération des trajectoires

Une trajectoire est l'ensemble des points dans l'espace de travail parcourus par le robot pour exécuter une tâche. Si une trajectoire est donnée dans l'espace opérationnel (trajectoire décrite par l'organe terminal), il est possible de générer les trajectoires correspondantes dans l'espace des variables articulaires (trajectoires décrite par les liaisons) en utilisant le modèle cinématique inverse.

Plusieurs critères peuvent être considérés pour le choix d'une trajectoire : l'énergie consommée, le temps de l'exécution de la tâche, l'environnement du robot (obstacles,..), l'évolution continue et lisse de certaines grandeurs physiques comme la position, la vitesse et l'accélération,...etc. Ceci offre au robot la possibilité de poursuivre cette trajectoire avec des commandes réalisables.

Dans les chapitres qui suivent, et afin de tester l'efficacité des commandes qui seront présentées, nous allons imposer au robot une famille de trajectoires assurant une continuité en position, vitesse et accélération, ce sont les trajectoires cycloïdales.

Une trajectoire cycloïdale évolue dans le temps selon la fonction suivante :

$$q(t) = \begin{cases} q_i + (q_f - q_i) \left(\frac{t}{t_f} - \frac{\sin(2\pi t/t_f)}{2\pi} \right) & \text{si } t \leq t_f \\ q_f & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

Où t_f : temps final

$q_i = q(0)$: position initiale

$q_f = q(t_f)$: position finale

Par dérivation on peut obtenir la vitesse et l'accélération qui sont données par :

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \frac{(q_f - q_i)}{t_f} \left(1 - \cos(2\pi t/t_f) \right) & \text{si } t \leq t_f \\ q_f & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} \frac{2\pi(q_f - q_i)}{t_f} \sin(2\pi t/t_f) & \text{si } t \leq t_f \\ q_f & \text{si } t > t_f \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

I.7. Modèle dynamique

La modélisation dynamique du robot manipulateur consiste à établir les équations différentielles non linéaires qui relient les efforts actionneurs τ_i (forces généralisées), aux variables articulaires ϑ_i , aux vitesses articulaires $\dot{\vartheta}_1$ et aux accélérations articulaires $\ddot{\vartheta}_1$.

L'ensemble de ces équations constitue le modèle dynamique du manipulateur.

On peut résoudre ces équations différentielles pour obtenir les mouvements q_i pour des efforts τ_i donnés dans le but d'une simulation du comportement dynamique du robot, on parle alors de modèle dynamique direct, comme on peut calculer les efforts τ_i pour des mouvements q_i connus, on parle dans ce cas du modèle dynamique inverse

La complexité structurelle des systèmes mécaniques articulés nous oblige à choisir une approche systématique pour résoudre ce problème. Le modèle dynamique des robots peut être obtenu des lois de la mécanique newtonienne et Lagrangienne.

C'est le formalisme d'Euler-Lagrange qui sera adopté pour établir le modèle dynamique du robot

• Formalisme d'Euler-Lagrange

Le formalisme ou la méthode d'Euler-Lagrange nous permet de décrire les équations de mouvements de plusieurs corps articulés les uns par rapport aux autres. Son usage est plus simple, pour les non spécialiste, que d'autres formalismes, même s'il exige souvent des calculs plus longs.

Pour un système mécanique articulé défini par n coordonnées généralisées indépendantes q_i , $i=1$ à n , l'équation d'Euler-Lagrange s'écrit dans le cas général :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial F_D}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad , \quad i = \overline{1, n} \quad (\text{I.12})$$

Avec

L : Lagrangien du système, défini par $L = E_c - E_p$, où E_c est l'énergie cinétique du système et E_p son énergie potentielle

F_D : Fonction de dissipation ayant la forme générale $F_D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n f_i \dot{q}_i^2$, où f_i sont les coefficients de frottement visqueux

τ_i : Forces généralisées créées par les actionneurs.

Ces équations dynamiques seront dérivées en 5 étapes :

- Calcul de l'énergie cinétique
- Calcul de l'énergie potentielle
- Calcul de la fonction de dissipation
- Calcul du Lagrangien
- Faire la différentiation

Certaines hypothèses simplificatrices sont à prendre en considération afin de permettre l'élaboration du modèle dynamique :

- Les frottements sont de nature linéaire et visqueuse
- Les segments sont supposés rigides
- Les actionneurs sont idéaux, c'est-à-dire leur sortie est directement proportionnelle au signal de commande
- Les masses des actionneurs sont supposées incluses avec les masses des segments

Appliquons, à présent, les 5 étapes citées ci-dessus au robot de type SCARA utilisé dans notre étude.

Etape 1 : Calcul de l'énergie cinétique

En considérant les mouvements possibles (rotation et/ou translation) de chaque articulation du robot, et après avoir effectué certains calculs, L'énergie cinétique total du robot aura l'expression suivante

$$E_c = a\dot{\vartheta}_1^2 + b(\dot{\vartheta}_1 + \dot{\vartheta}_2)^2 + c\dot{\vartheta}_1(\dot{\vartheta}_1 + \dot{\vartheta}_2)\cos(\vartheta_2) + d.\dot{d}_3^2 \quad (\text{I.13})$$

Avec $a = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}m_1 + m_2 + m_3\right)l_1^2$

$$b = \left(\frac{7}{24}m_2 + \frac{1}{2}m_3\right)l_2^2$$

$$c = \left(\frac{1}{2}m_2 + m_3\right)l_1l_2$$

$$d = \frac{1}{2}m_3$$

Etape 2 : Calcul de L'énergie potentielle

$$E_p = (m_1 + m_2 + m_3)gl_3 - e.d_3 \quad (\text{I.14})$$

Avec $e = m_3g$

Etape 3 : Détermination de La fonction de dissipation

$$F_D = \frac{1}{2}(f_1\dot{\vartheta}_1^2 + f_2\dot{\vartheta}_2^2 + f_3.\dot{d}_3^2) \quad (\text{I.15})$$

Etape 4 : Lagrangien du système $L = E_c - E_p$

Etape 5 : Différentiation

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\vartheta}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial \vartheta_1} + \frac{\partial F_D}{\partial \dot{\vartheta}_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\vartheta}_2}\right) - \frac{\partial L}{\partial \vartheta_2} + \frac{\partial F_D}{\partial \dot{\vartheta}_2} = \tau_2 \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_3}\right) - \frac{\partial L}{\partial d_3} + \frac{\partial F_D}{\partial \dot{d}_3} = \tau_3 \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Après avoir fait la différentiation et en prenant $\tau_1 = k_1u_1$, $\tau_2 = k_2u_2$ et $\tau_3 = k_3u_3$, on obtient les équations du modèle dynamique du robot :

$$\begin{cases} 2a\ddot{\vartheta}_1 + 2b(\ddot{\vartheta}_1 + \ddot{\vartheta}_2) + c(2\ddot{\vartheta}_1 + \ddot{\vartheta}_2)\cos(\vartheta_2) - c(2\dot{\vartheta}_1 + \dot{\vartheta}_2)\dot{\vartheta}_2\sin(\vartheta_2) + f_1\dot{\vartheta}_1 = k_1u_1 \\ 2b(\ddot{\vartheta}_1 + \ddot{\vartheta}_2) + c\ddot{\vartheta}_1\cos(\vartheta_2) + c\dot{\vartheta}_1^2\sin(\vartheta_2) + f_2\dot{\vartheta}_2 = k_2u_2 \\ 2d.\ddot{d}_3 - e + f_3\dot{d}_3 = k_3u_3 \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

I.8 Résultats de simulation

La résolution du système (I.17) a été faite en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 avec un pas d'intégration $h = 10^{-3}s$ et des conditions initiales nulles. Les simulations sont réalisées en utilisant la programmation sous MATLAB.

Les paramètres du robot utilisé sont [Bali, 95]

$$m_1 = 15.91 \text{ kg} ; m_2 = 11.36 \text{ kg} ; m_3 = 3 \text{ kg}$$

$$l_1 = l_2 = 0.432 \text{ m} ; l_3 = 0.5 \text{ m}$$

$$f_1 = f_2 = 7.10^{-4} \text{ N.m.rad}^{-1}.s ; f_3 = 100 \text{ N.m}^{-1}.s$$

$$k_1 = k_2 = 0.18 \text{ N.m.V}^{-1} ; k_3 = 0.18 \text{ N.V}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2} \text{ (Accélération de la gravité)}$$

Les réponses du robot en boucle ouverte, en position, vitesse et accélération à un échelon unitaire de tension, sur un horizon de 10 s sont présentées sur les figures ci-dessous.

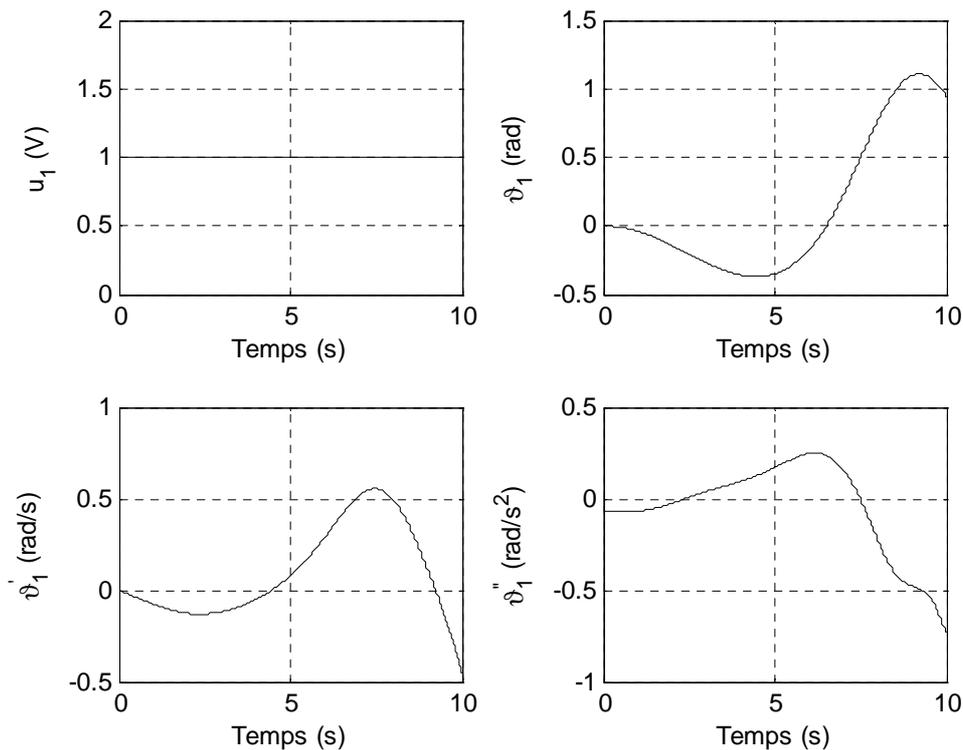


Figure I.9 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 1

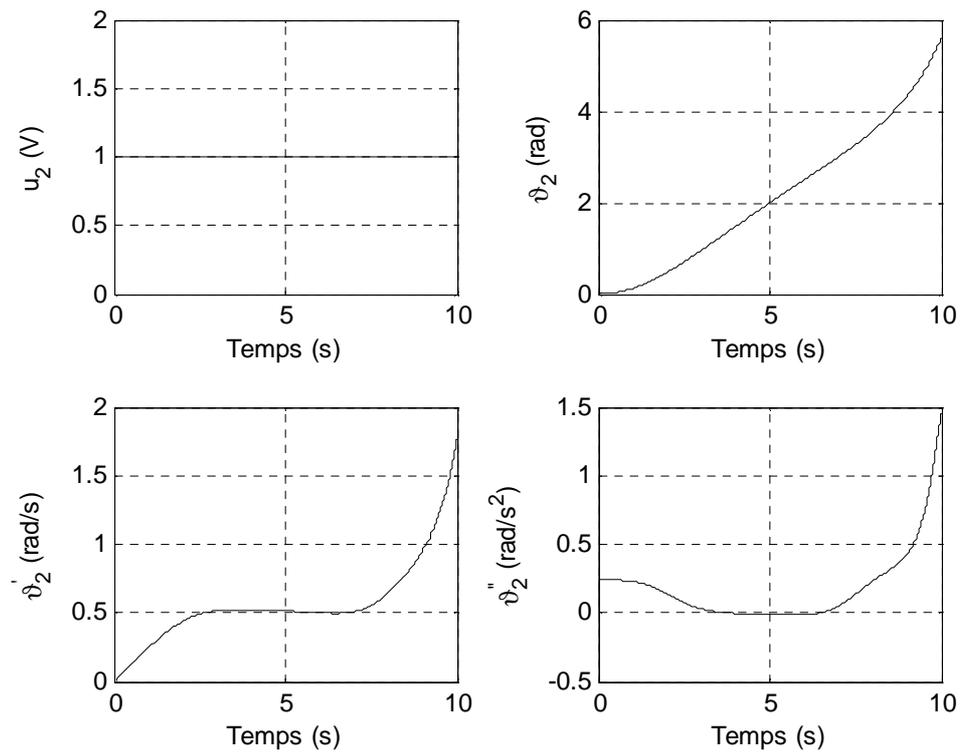


Figure I.10 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 2

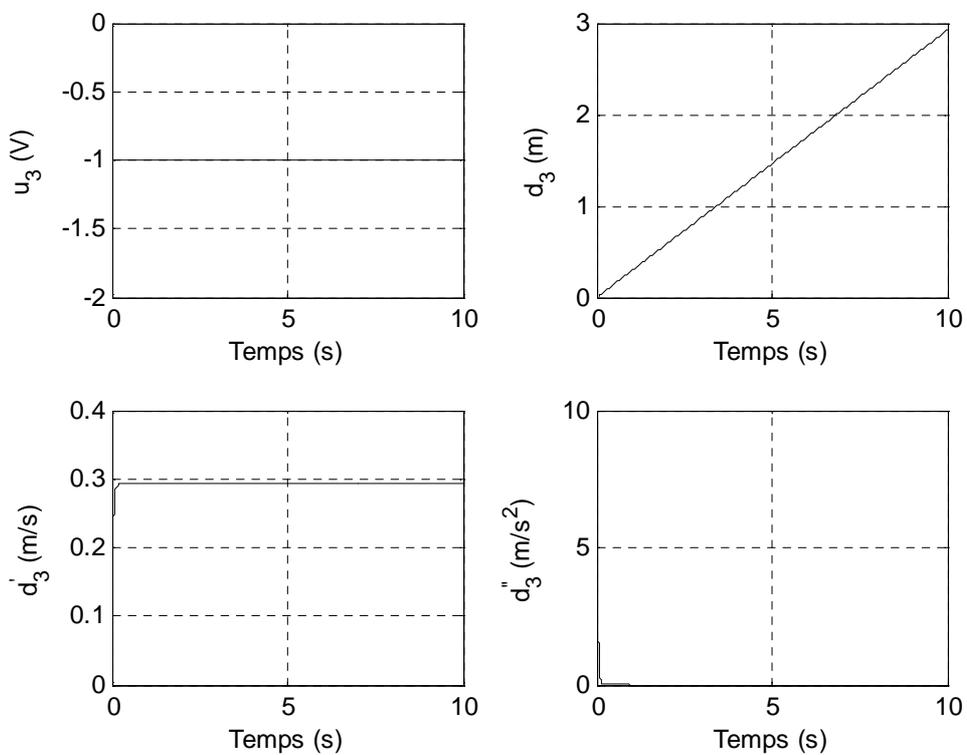


Figure I.11 Commande, position, vitesse et accélération de l'articulation 3

I.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du robot manipulateur. Ainsi, après avoir donné quelques notions sur les robots et présenté le robot utilisé dans notre étude, les différents modèles de ce dernier ont été élaborés. Le modèle géométrique permet d'établir la relation entre les coordonnées opérationnelles et les coordonnées généralisées, tandis que le modèle cinématique établit la relation entre les variations de ces grandeurs. Le formalisme d'Euler-Lagrange a été adopté afin d'élaborer le modèle dynamique du robot. Ce modèle est nécessaire pour simuler le comportement du robot tant en boucle ouverte mais plus particulièrement en boucle fermée pour tester l'efficacité des commandes qui seront présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre II
Commande par régulateur
PID du robot

II.1. Introduction

Le domaine de la commande des robots manipulateurs est très vaste, il est encore en pleine évolution. Plusieurs algorithmes de commande ont été développés pour satisfaire les objectifs exigés par les cahiers des charges. Les robots manipulateurs sont des systèmes non linéaires présentant une diversité de comportements et des dynamiques fortement couplées ce qui explique la grande variété d'approches développées afin de commander cette classe de systèmes. Cependant, il a été constaté une certaine réticence à adopter des méthodes de commande non linéaire, souvent jugées difficiles à comprendre, compliquées à mettre en œuvre et dont l'analyse systématique des performances se révèle complexe. Ainsi, il est intéressant de prédire si les outils de commandes linéaires pourraient être utilisés pour traiter des problèmes non linéaires. Parmi ces outils, la commande par régulateur PID constitue l'une des plus anciennes et plus intéressante techniques utilisées. [Leena, 2012] [Makhloufi, 15]

Depuis son invention en 1910, et le développement par Zighler et Nichols de méthodes directes pour le réglage de ses paramètres, l'utilisation de la commande par régulateur PID, appelée aussi régulateur à 3 termes, n'a cessé de s'accroître. En effet, Malgré les techniques de commande avancées qui ont été développées dans le domaine de l'automatique, plus de 90% des régulateurs industriels sont basés sur le principe du régulateur PID. Ceci est principalement dû à la simplicité de ce régulateur, son fonctionnement clair, son implantation facile ainsi que ses performances dans la commande. [Maki, 15]

L'objectif de ce chapitre, et après avoir donné des notions sur la régulation automatique d'une façon générale, est de synthétiser un régulateur PID pour la commande du robot afin d'imposer aux articulations d'atteindre une position finale donnée suivant une trajectoire désirée. Des résultats de simulation seront présentés à la fin du chapitre afin d'évaluer les performances de ce régulateur.

II.2. Régulation automatique [Rivoire, 94] [Kadri, 14]

II.2.1. Définition

La régulation automatique est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la température, la pression, le niveau, le débit, le pH, la concentration,etc. en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinies.

II.2.2. But de la régulation automatique

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

Tout système à régler possède un régulateur, qu'il soit analogique ou numérique. Ces régulateurs ont pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

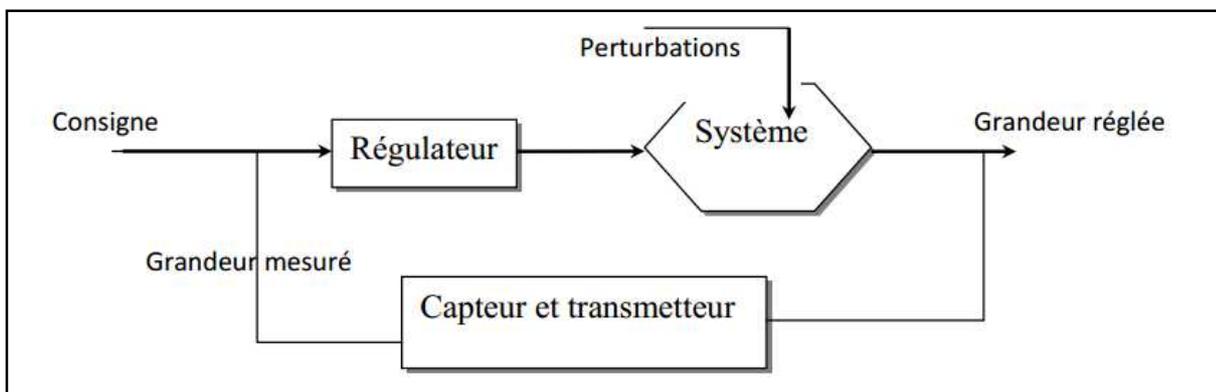


Figure II.1 Schéma de principe de régulation automatique

II.2.3. Les différents types de régulateurs

▪ Régulateur à action proportionnelle (P)

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple et naturelle, puisqu'il construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $e(t)$. Il agit principalement sur le gain du système asservi et permet donc d'améliorer notablement la rapidité, la précision et la stabilité.

➤ Loi de commande du régulateur P

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (\text{II.1})$$

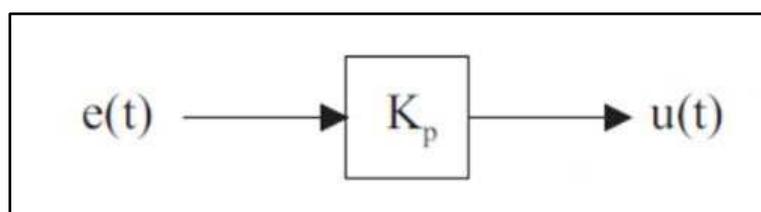


Figure II.2 Schéma fonctionnel du régulateur P

- **Régulateur à action intégrale (I)**

Les exemples d'asservissement ont montré qu'un système, même avec un régulateur P, pouvait présenter une erreur permanente entre la consigne et la sortie. Cette erreur intervenant alors que les signaux d'entrée sont constants, elle est dite erreur statique.

Pour remédier à ce problème la solution consiste à intégrer l'erreur.

- Loi de commande du régulateur I

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{II.2})$$

Où T_i est appelée la constante de temps d'intégration.

- Fonction de transfert du régulateur I

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (\text{II.3})$$

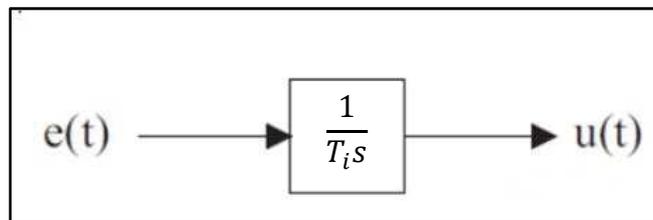


Figure II.3 Schéma fonctionnel du régulateur I

- **Régulateur à action proportionnelle intégrale (PI)**

Le régulateur PI est le régulateur le plus utilisé en pratique où ses contributions à la précision mais aussi à la robustesse du système asservi sont particulièrement appréciées

- Loi de commande du régulateur PI

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (\text{II.4})$$

- Fonction de transfert du régulateur PI

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{1+s.T_i}{s.T_i} \quad (\text{II.5})$$

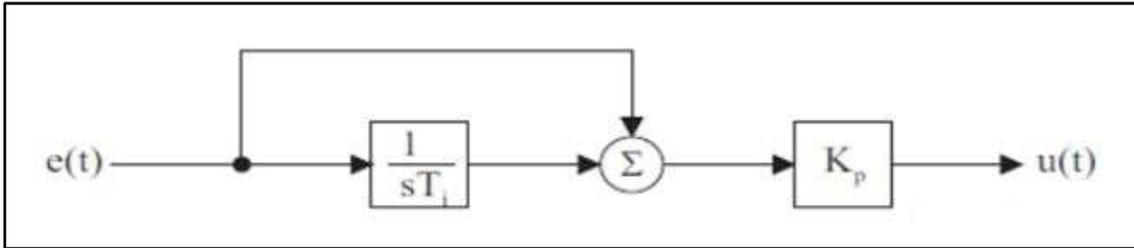


Figure II.4 Schéma fonctionnel du régulateur PI

- **Régulateur dérivateur pur (D) et régulateur dérivateur filtré**

- Loi de commande du régulateur D

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II.6})$$

- Fonction de transfert du régulateur D

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = T_d \cdot s \quad (\text{II.7})$$

Où T_d est appelée constante de temps de dérivation. Elle intervient également comme un gain.

La fonction de transfert de ce type de correcteur est purement théorique : un système physique ne peut pas avoir un numérateur de degré supérieur à celui du dénominateur.

Le correcteur approchant le mieux l'effet dérivateur tout en étant réalisable est un correcteur dérivateur filtré de la forme :

$$R(s) = \frac{T_d s}{1 + \tau p} \quad (\text{II.8})$$

Avec : $\tau = \frac{T_d}{N}$ et N entier > 1 (5 à 10).

- **Régulateur PD**

On notera que l'action D ne permettant pas la transmission d'un signal constant, elle doit donc toujours s'accompagner au moins d'une action P en parallèle (régulateur PD).

- Loi de commande du régulateur PD

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (\text{II.9})$$

- Fonction de transfert du régulateur PD

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + sT_d) \quad (\text{II.10})$$

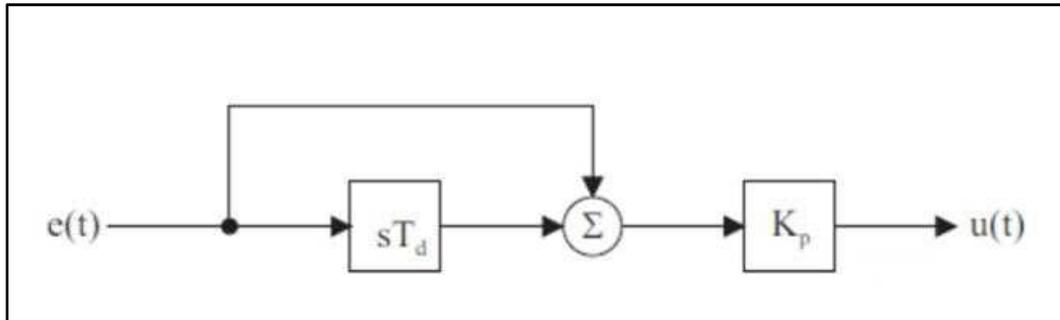


Figure II.5 Schéma fonctionnel du régulateur PD

II.3. Régulateur Proportionnel Intégrateur Dérivé PID [Ang, 05]

II.3.1.Principe général

Un régulateur PID est un régulateur qui dispose des trois actions P, I et D. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques. Son intérêt est de réunir les effets positifs des trois correcteurs de base. Grâce au terme I, il permet l'annulation de l'erreur statique tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur PI.

- Loi de commande du régulateur PID

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (\text{II.11})$$

- Fonction de transfert du régulateur PID

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + sT_i + s^2 T_i T_d}{sT_i} \quad (\text{II.12})$$

II.3.2. Réglages du PID

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients K_p , $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ et $K_d = K_p \cdot T_d$, afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé. Les objectifs sont d'être robustes, rapide et précis. Il faut pour cela :

- dans le cas d'un fonctionnement en mode de régulation (consigne fixe) choisir des réglages permettant à la grandeur réglée de retourner dans un temps raisonnable à sa valeur de consigne
- dans le cas de fonctionnement de la boucle en mode d'asservissement (consigne variable), choisir des réglages permettant de limiter le ou les éventuels dépassements de la grandeur réglée
- la robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus/testés (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...)
- la rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire ;
- le critère de précision est basé sur l'erreur statique (ou de statisme).

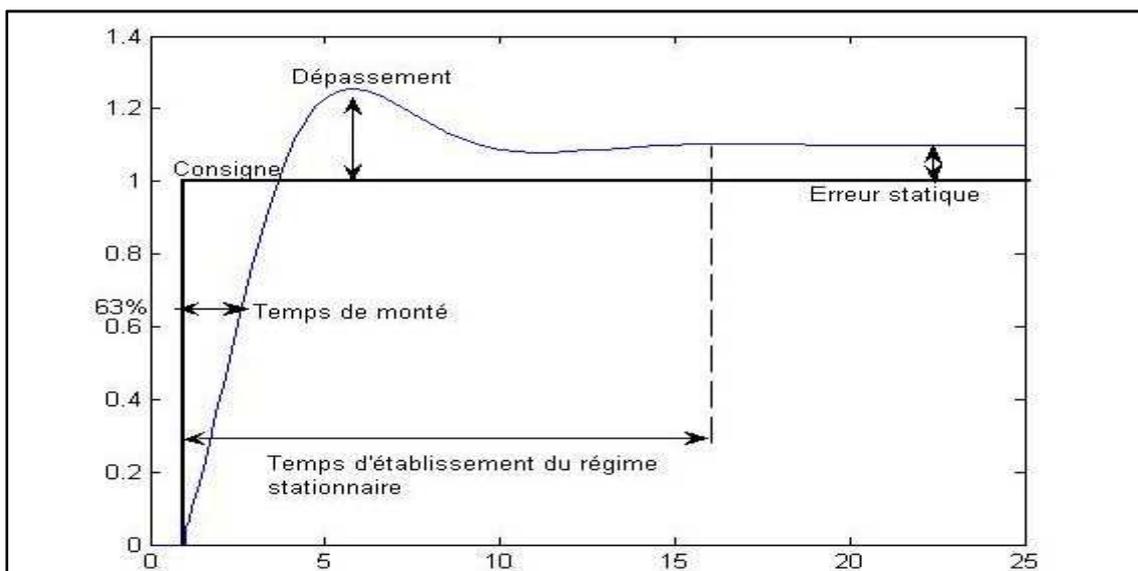


Figure II.6 La réponse type d'un procédé stable

Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

- K_p : lorsque K_p augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

- K_i : lorsque K_i augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.
- K_d : lorsque K_d augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

Pour ces trois paramètres, le réglage au-delà d'un seuil trop élevé a pour effet d'engendrer une oscillation du système de plus en plus importante menant à l'instabilité.

Sous forme d'un tableau récapitulatif, on résume les avantages et les limitations des actions de base du régulateur PID

Action	Points forts	Points faibles
P	Action instantanée	Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire
I	Annule l'erreur statique	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la rapidité Apporte un effet stabilisant	Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général, on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

II.3.3. Structures des régulateurs PID électroniques :

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets du régulateur PID. Ces architectures sont apparues grâce à l'emploi des amplificateurs opérationnels. On distingue trois structures pour les régulateurs PID : série, parallèle ou mixte

1. La structure parallèle

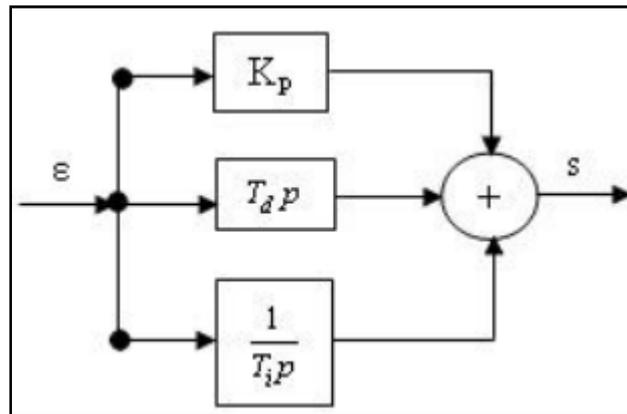


Figure II.7 Structure parallèle du PID

2. La structure mixte

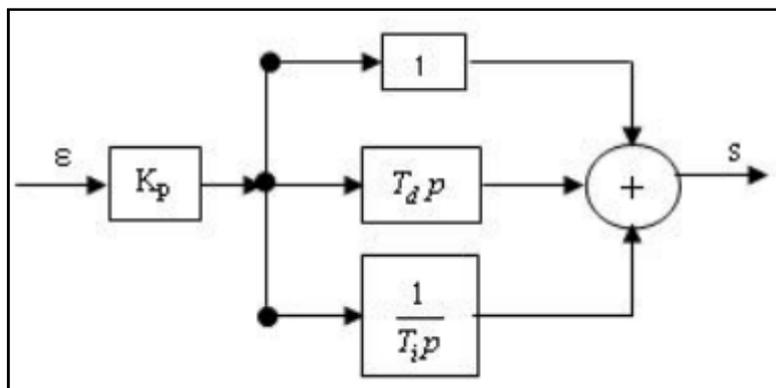


Figure II.8 Structure mixte du PID

3. La structure série

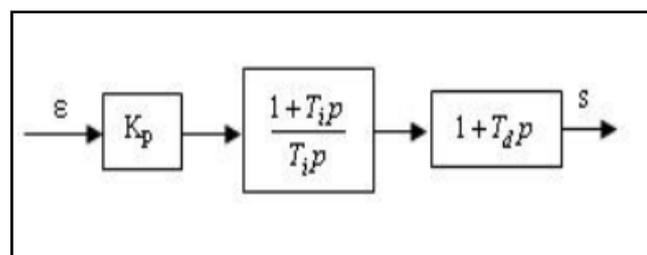


Figure II.9 Structure série du PID

II.4. Commande par régulateur PID des robots manipulateurs [ADOUANE, 10]

Le schéma classique d'une commande par PID d'un robot manipulateur est représenté sur la figure ci- dessous

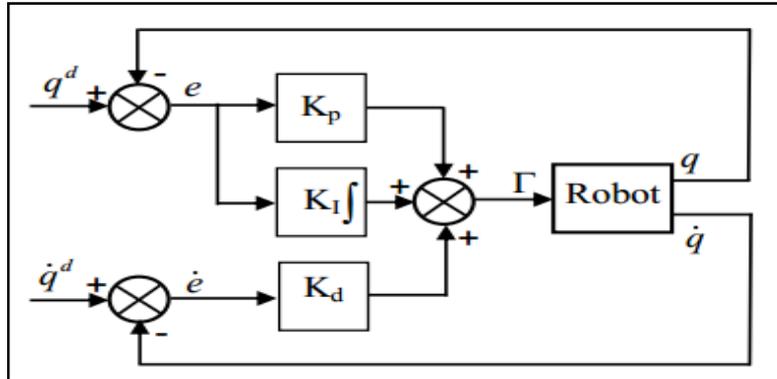


Figure II.10 Schéma classique de la commande PID d'un robot manipulateur

La loi de commande du PID appliquée à l'articulation j du robot est donnée par :

$$\tau_j = K_{pj}(q_{dj} - q_j) + K_{ij} \int_0^t (q_{dj} - q_j) dt + K_{dj}(\dot{q}_{dj} - \dot{q}_j) \quad (\text{II.13})$$

Où τ_j est le couple ou force appliqué par l'actionneur

$q_{dj}(t)$, $\dot{q}_{dj}(t)$ Sont, respectivement, la position et vitesse désirées de l'articulation j

$q_j(t)$, $\dot{q}_j(t)$ Sont, respectivement, la position et vitesse réelles de l'articulation j

K_{pj} , K_{ij} et K_{dj} sont, respectivement, les gains proportionnel, intégral et dérivé du régulateur PID dédié à la commande de l'articulation j

II.5. Résultats de simulation

Pour implanter la commande PID au robot, nous avons imposé à chaque articulation de suivre une trajectoire cycloïdale d'une durée de 5s afin d'atteindre une position finale. Cette position finale est ensuite fixée pendant 5s pour voir le comportement en régime statique du robot.

Pour le choix des paramètres du régulateur PID nous avons opté pour la méthode de réglage manuel (appelé aussi méthode d'essai et erreur), c'est à dire que les paramètres sont variés manuellement jusqu'à obtention de résultats satisfaisants. [Maki, 15][Ang, 05]

Commande par régulateur P

Nous présentons d'abord dans les figures II.11 a), b), c) et d) les résultats de la commande par régulateur P, où nous montrons comment le bon choix des gains K_{pj} a été fait, après quelques essais.

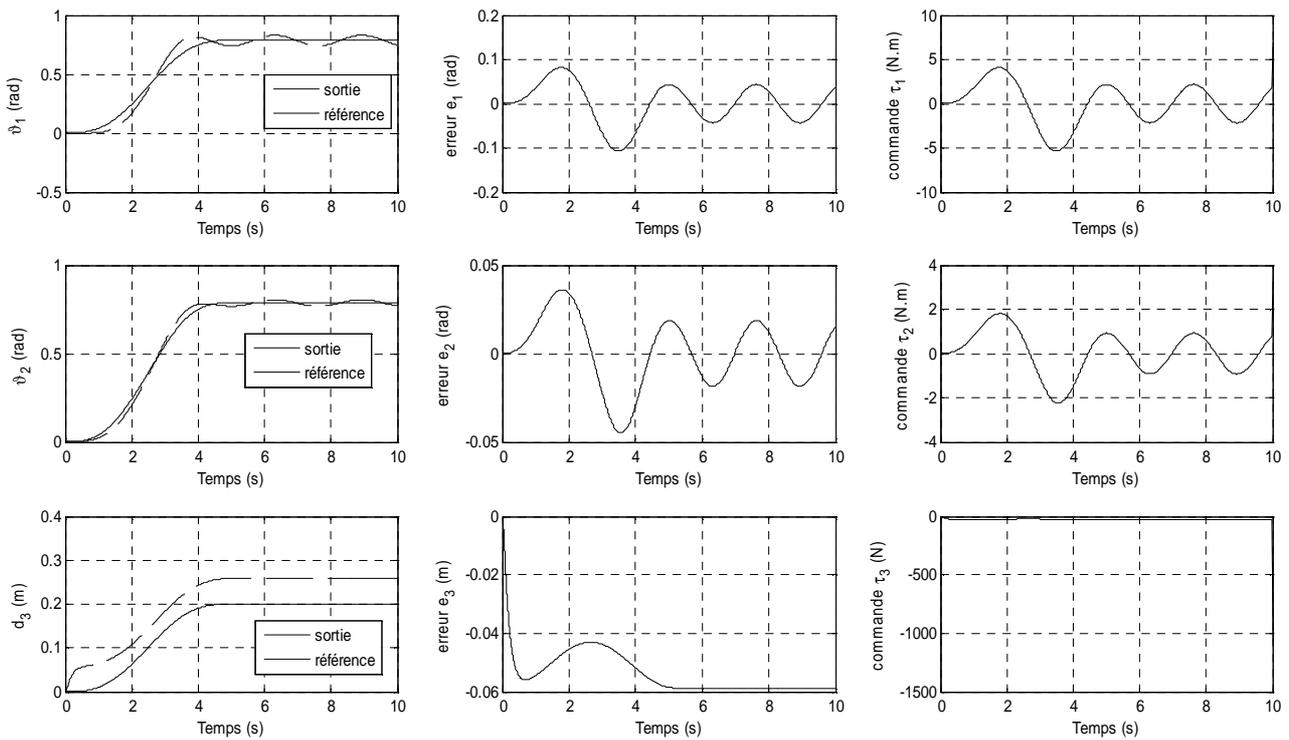


Figure II.11.a) Commande par régulateur P ($K_{p1}=50$; $K_{p2}=50$; $K_{p3}=500$)

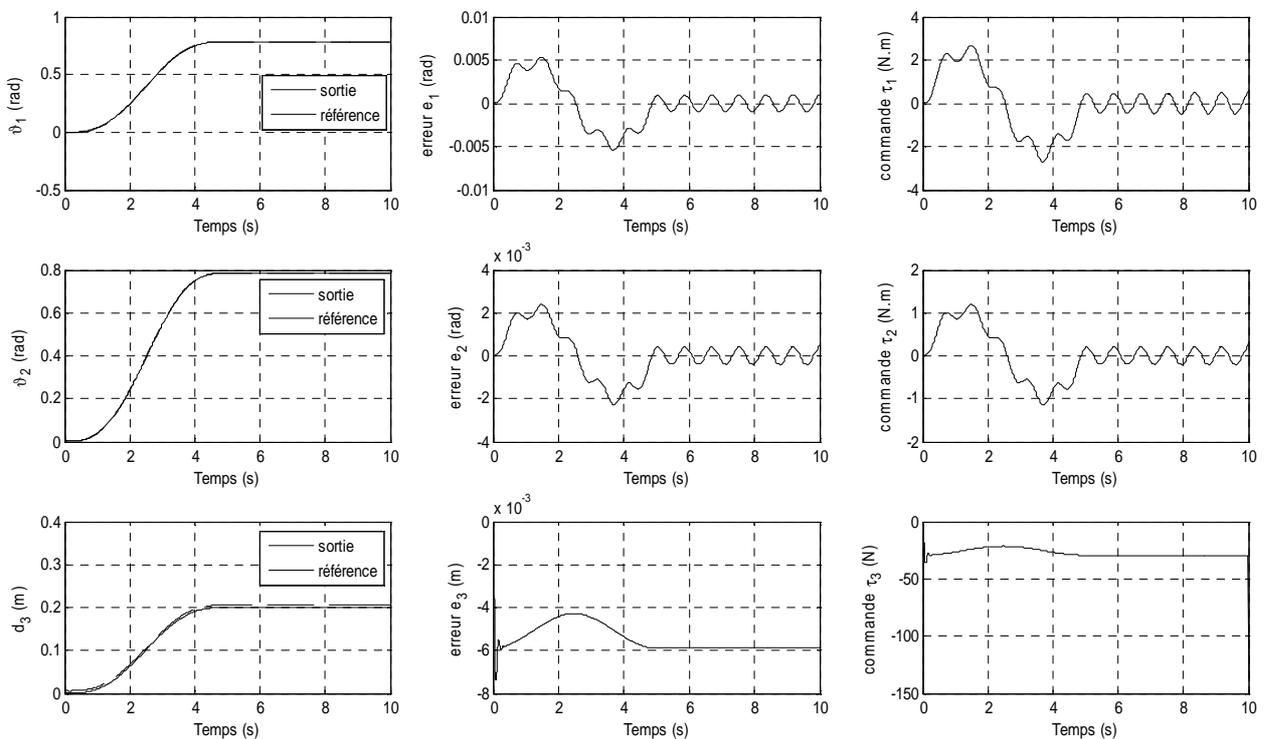


Figure II.11.b) Commande par régulateur P ($K_{p1}=500$; $K_{p2}=500$; $K_{p3}=5000$)

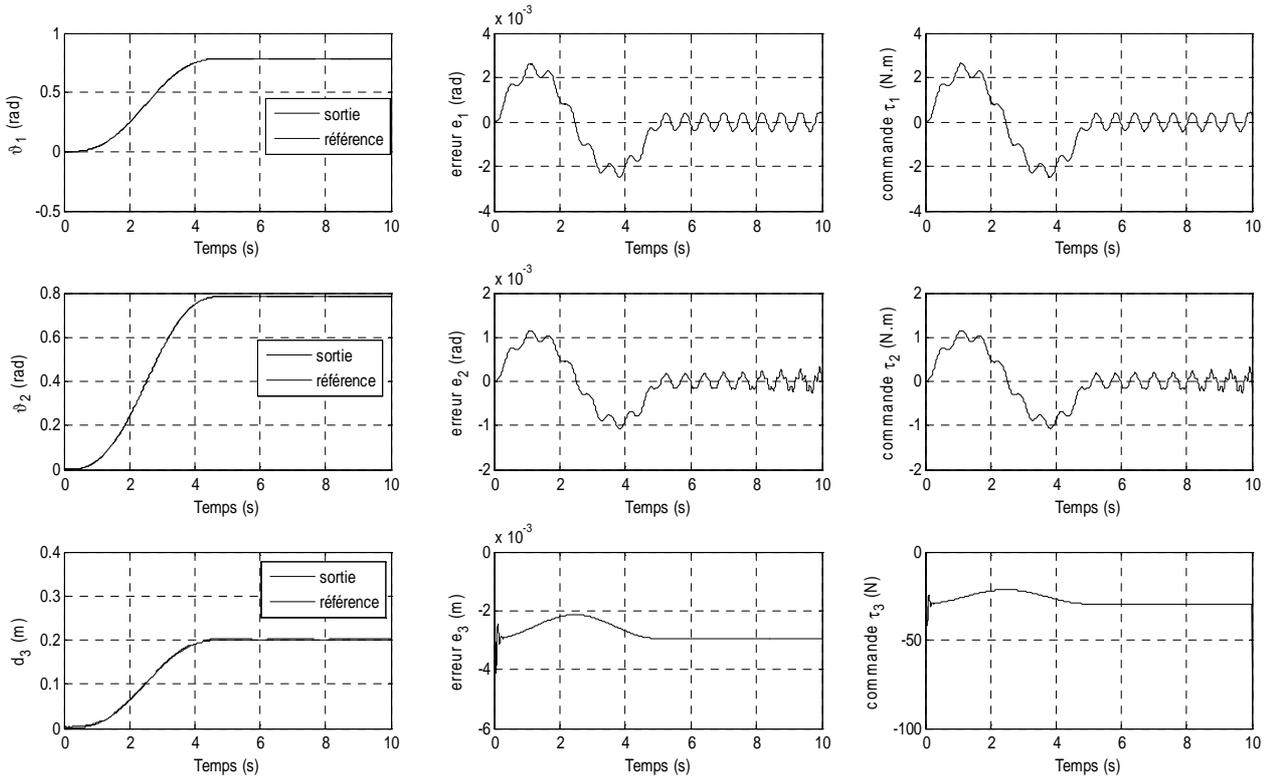


Figure II.11.c) Commande par régulateur P ($K_{p1}=1000$; $K_{p2}=1000$; $K_{p3}=10000$)

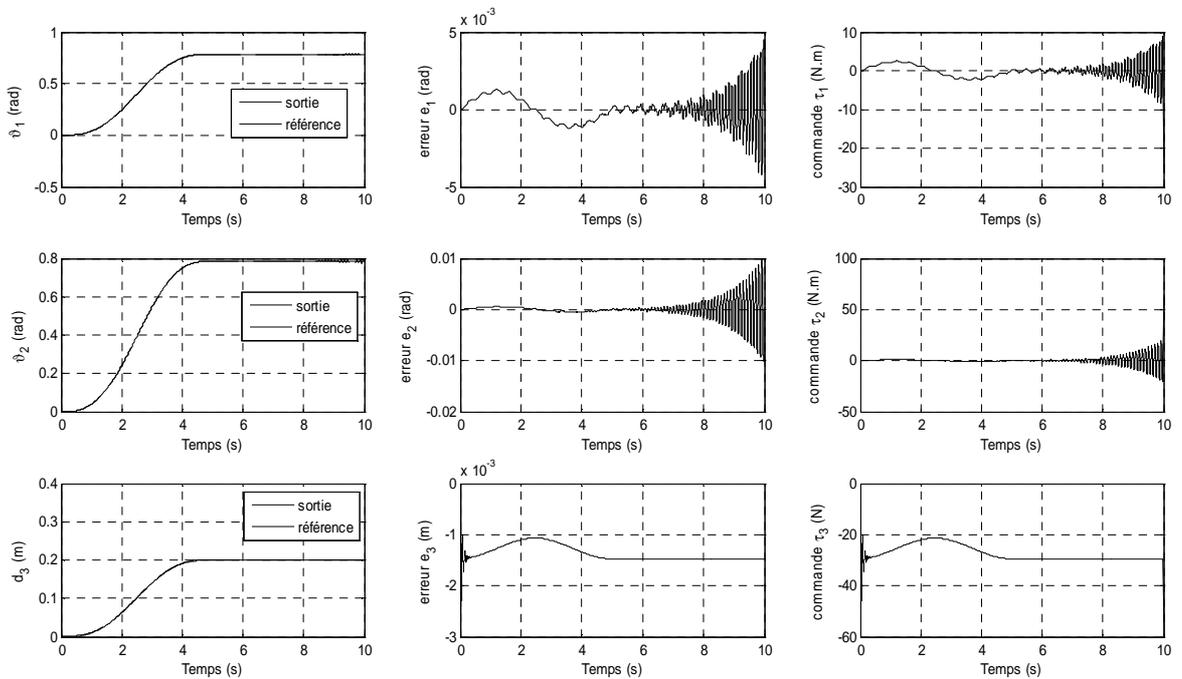


Figure II.11.d) Commande par régulateur P ($K_{p1}=2000$; $K_{p2}=2000$; $K_{p3}=20000$)

On constate que pour des gains K_{pj} relativement faibles le régulateur présente de mauvaises performances de poursuite. Donc, on augmente les valeurs de K_{pj} jusqu'à obtention de performances acceptables. Au delà de certaines valeurs le système devient instable.

Pour les essais effectués, on peut voir que le choix des valeurs $K_{p1}=500$; $K_{p2}=500$; $K_{p3}=5000$ nous donne des résultats satisfaisants sans causer l'instabilité du système. On voit bien aussi que l'action P seule ne peut pas annuler l'erreur statique.

On remarque pour les articulations 1 et 2 que l'erreur statique, bien qu'elle diminue en augmentant K_{pj} , présente une oscillation permanente. Ceci ne signifie pas que le système est à la limite de la stabilité, mais il est dû principalement à l'effet d'interaction mutuelle des articulations 1 et 2.

La cause pour laquelle nous avons imposé à K_{p3} d'avoir une valeur 10 fois plus grande que K_{p1} et K_{p2} est que la troisième articulation présente un frottement visqueux beaucoup plus grand.

Commande par régulateur PID

Nous présentons dans la figure II.12 les résultats de la commande par régulateur PID appliquée au robot. Les paramètres des régulateurs, et après quelques essais et tests de simulation, ont été fixés aux valeurs suivantes :

$$K_{p1}=1000 ; K_{p2}=1000 ; K_{p3}=5000$$

$$K_{i1}=100 ; K_{i2}=100 ; K_{i3}=10000$$

$$K_{d1}=100 ; K_{d2}=100 ; K_{d3}=1000$$

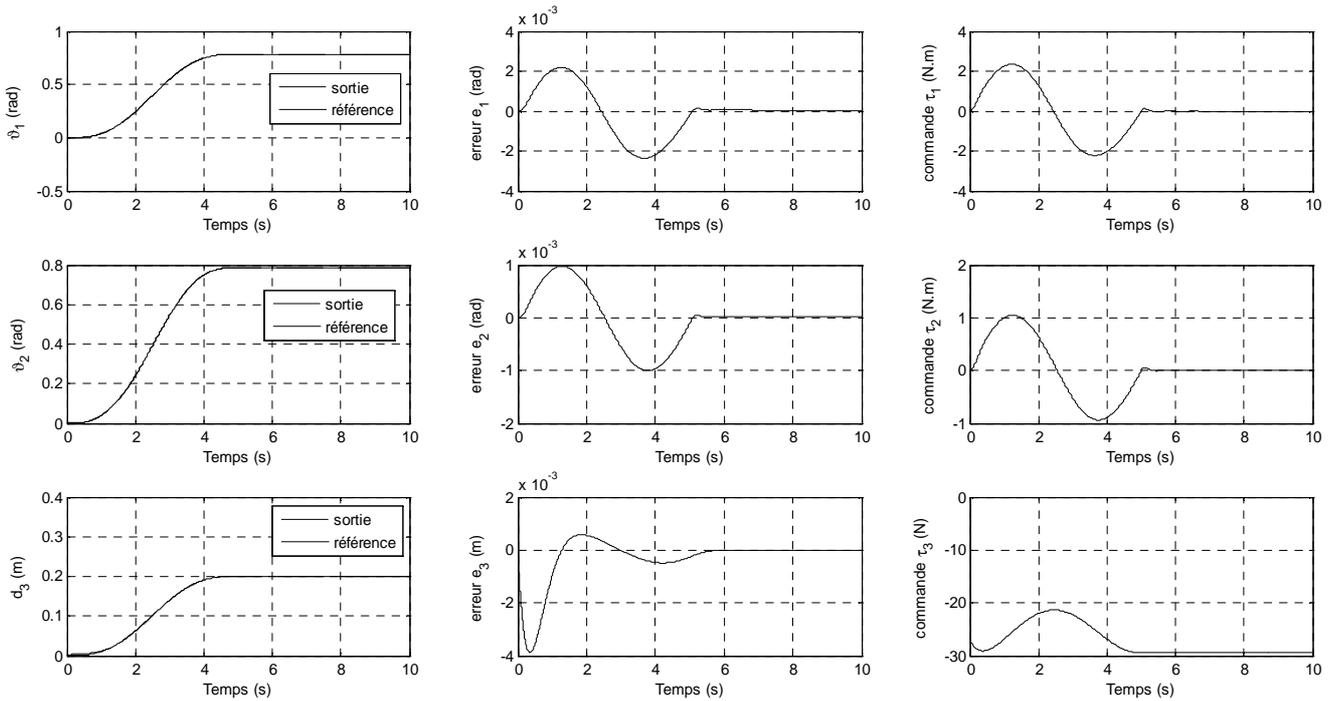


Figure II.12 Commande par régulateur PID

On constate que le régulateur PID donne de très bonnes performances de poursuite et de régulation avec des signaux de commande réalisables. L'erreur statique se trouve aussi annuler grâce à l'action intégrale tout en garantissant la stabilité du système grâce à l'action dérivée.

Tests de robustesse du régulateur PID

Pour évaluer la robustesse du régulateur PID synthétisé, nous avons effectué 2 tests :

Test 1 : une perturbation externe sous forme d'un couple résistant d'une valeur égale à 2 N.m qui vient s'opposer au mouvement des articulations 1 et 2 à partir de l'instant 2s. Les résultats sont présentés sur la figure II.13.

Test 2 : une variation paramétrique des coefficients de frottements visqueux des articulations 1 et 2 (de $7 \cdot 10^{-4} N.m.rad^{-1}.s$ les coefficients de frottement deviennent $7 N.m.rad^{-1}.s$). Les résultats sont présentés sur la figure II.14.

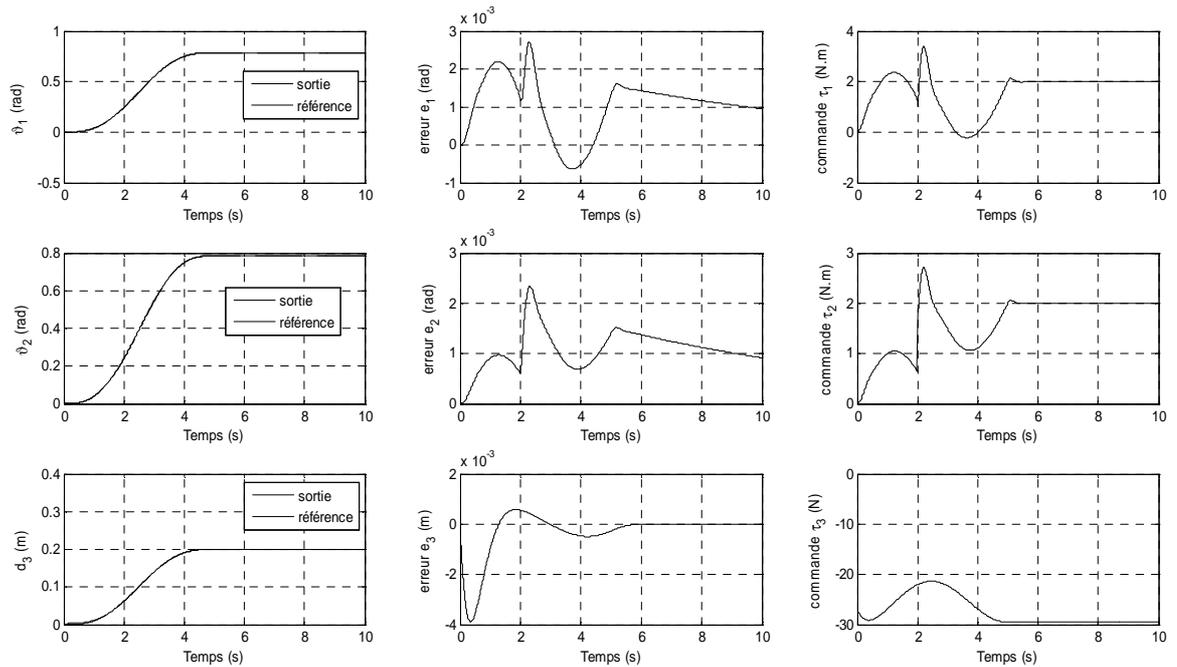


Figure II.13 Commande par régulateur PID avec couple résistant à l'instant $t=2s$

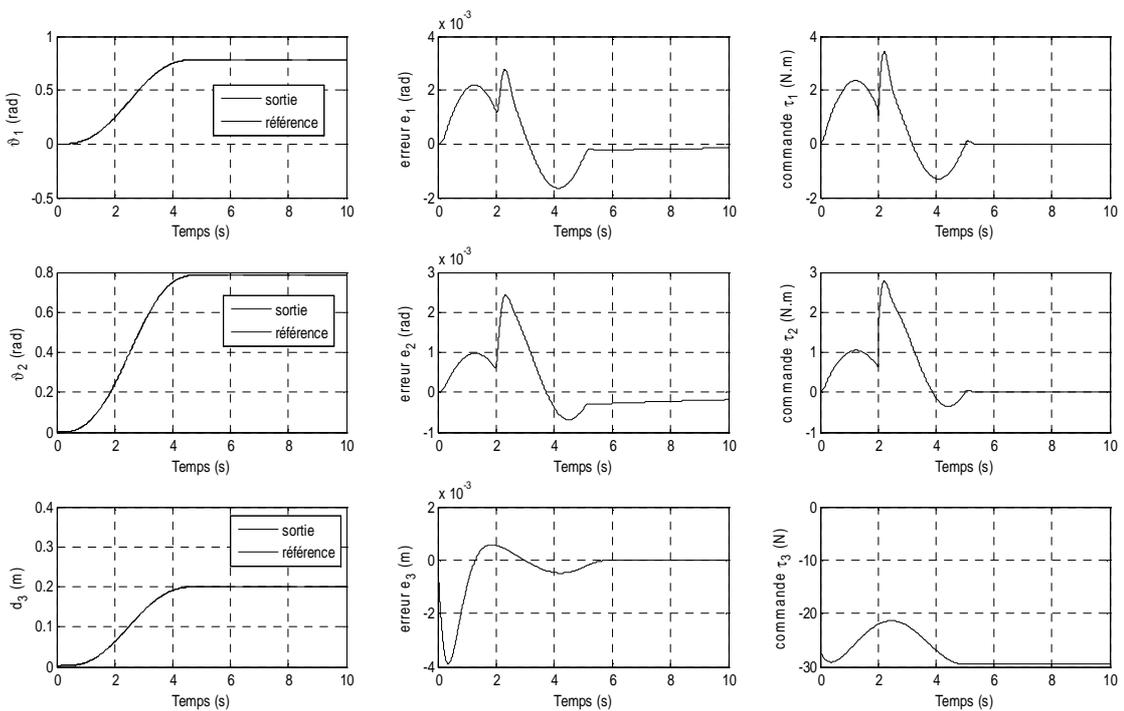


Figure II.14 Commande par régulateur PID avec variation paramétrique à l'instant $t=2s$

Les résultats obtenus montrent que le régulateur PID présente effectivement un caractère robuste vis-à-vis des perturbations externes et des variations paramétriques qui peuvent se manifester à n'importe quel instant dans l'environnement de travail réel d'un robot. Néanmoins il faut noter que cette robustesse reste valable dans certaines limites du fait que les paramètres du PID sont fixes et ont été choisis pour certaines conditions opératoires. Si on s'éloigne beaucoup de ces conditions les performances du PID se trouveront fortement détériorées.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre la commande classique par régulateur PID du robot a été étudiée.

Après avoir donné des notions sur la régulation automatique d'une façon générale et sur le régulateur PID avec ses trois actions d'une façon particulière, on est directement passé à la synthèse de ce régulateur pour le robot en utilisant le réglage manuel pour la détermination des paramètres.

Les résultats de simulations ont montré l'efficacité du régulateur dans la poursuite de trajectoires désirées et aussi dans la régulation lorsque la consigne est fixe. Des tests de robustesse ont montré la capacité du régulateur à compenser les perturbations externes ainsi que les variations qui peuvent surgir sur les paramètres du robot. Toute fois il faut noter que ce caractère robuste reste valable dans certaines limites car les paramètres du régulateur sont fixes. Il sera alors intéressant d'étudier le cas où ces paramètres peuvent être modifiés pour s'adapter aux nouvelles situations confrontées par le robot dans son environnement interne ou externe. Ceci est l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre III

Commande adaptative décentralisée du robot

III.1. Introduction

Le modèle dynamique d'un robot ne pouvant être parfait, il est naturel que les chercheurs appliquent les théories de la commande adaptative pour estimer ou ajuster en ligne les valeurs des paramètres dynamiques utilisés dans la commande. Une définition de la commande adaptative est proposée par Y.D. Landau : "Un système adaptatif mesure un index de performance (IP) en utilisant les entrées, les d'états et les sorties d'un système ajustable. Cet index est comparé à un ensemble de valeurs fixées. A partir de cette comparaison, le mécanisme d'adaptation modifie les paramètres du système ajustable et/ou engendre une entrée auxiliaire afin de maintenir la valeur de l'index proche des valeurs de référence. On peut à l'heure actuelle considérer que la commande adaptative des robots rigides a atteint une bonne maturité comme en témoigne les nombreuses méthodes publiées sur le sujet. Il s'en dégage cinq stratégies, significatives des progrès réalisés dans ce domaine :

1. Simplification du modèle dynamique.
2. Application des techniques adaptatives développées pour les systèmes linéaires au cas des robots.
3. Proposition d'une commande adaptative non linéaire asymptotiquement stable.
4. Utilisation des propriétés de la passivité pour développer une loi de commande adaptative non linéaire asymptotiquement stable.
5. Utilisation pour l'adaptation d'un modèle qui n'est pas fonction des accélérations articulaires tel que le modèle dynamique filtré ou le modèle énergétique.

Les lois de commande proposées dans les deux premières stratégies ne sont valables que pour des mouvements lents et ne prennent pas en compte le modèle complet du robot. La loi de commande adaptative non linéaire de Craig dépend de deux hypothèses restrictives la mesure des accélérations articulaires et l'existence d'une borne de l'inverse de la matrice d'inertie estimée. Les lois de commande des quatrième et cinquième stratégies n'ont pas besoin de mesures des accélérations articulaires et sont, au moins de point de vue théorique, les plus intéressantes. [MAKHLOUFI, 2015].

Dans ce chapitre, et après avoir donné quelques notions sur la commande adaptative et ses différents types, une technique de commande adaptative décentralisée sera présentée et appliquée au robot. Des simulations seront effectuées pour évaluer performances de cette loi commande.

III.2. Principe de la commande adaptative

Dans certaines applications où les paramètres du procédé variaient avec le temps, l'utilisation d'un régulateur robuste à paramètres fixes peut être insuffisante pour garantir les performances requises dans l'ensemble des régimes de fonctionnement possibles. C'est ainsi qu'une identification imprécise ou une variation des paramètres du système influe considérablement sur les performances portées par ces régulateurs, en plus ces derniers se comportent difficilement avec le régime dynamique dû à la variation de la charge. Pour cela la commande adaptative trouve un grand essor pour améliorer la robustesse de la commande du processus.

La commande adaptative est un ensemble de techniques destinées à ajuster automatiquement les paramètres du correcteur des systèmes de commande lorsque les caractéristiques du processus et les perturbations sont inconnues ou varient dans le temps. Son utilisation requiert la mesure d'un certain indice de performance qui est comparé à l'indice désiré. Suivant l'écart obtenu, le mécanisme d'adaptation (algorithme d'adaptation) modifie les paramètres du correcteur ajustable afin de maintenir l'indice de performance à la valeur désirée. [Meziane, 09]

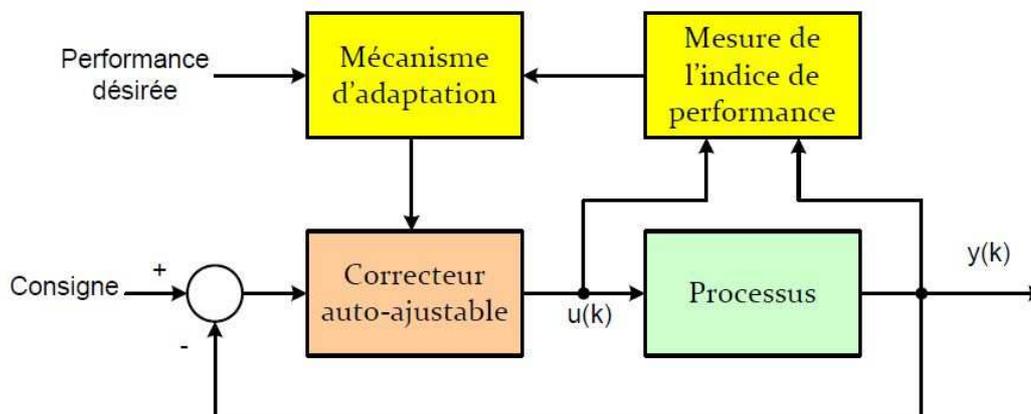


Figure III.1 Principe des systèmes de commande adaptative

III.3. Différents types de commande adaptative

Il existe essentiellement trois approches de la commande adaptative.

III.3.1. Commande adaptative a gain programmé

Cette méthode suppose que les non-linéarités sont connues, car il n'existe pas de correction pour compenser une programmation incorrecte (fonctionnement en boucle ouverte). Elle est utilisée dans les cas où il est possible de déterminer les changements survenant dans la dynamique du système en

mesurant certaines grandeurs qui sont en corrélation avec ces changements. Elle a cependant l'avantage d'ajuster rapidement les paramètres du correcteur lors de changements rapides de la dynamique du processus. Cependant l'inconvénient majeur réside lorsque le processus subit des changements inattendus.

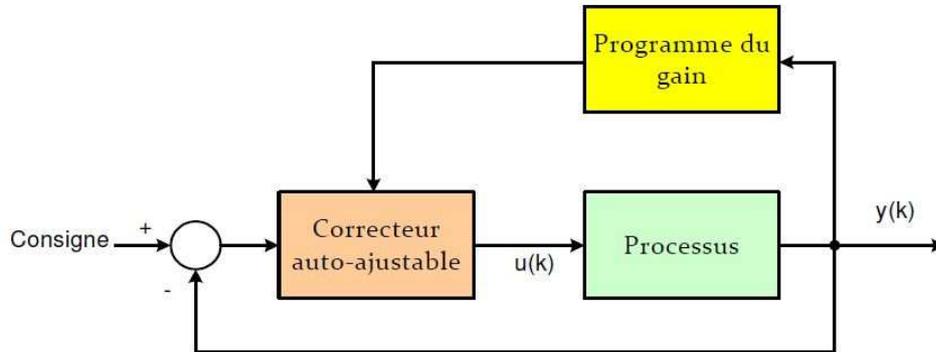


Figure III.2 Commande adaptative à gain préprogrammé

III.3.2. Commande adaptative à correcteur auto-ajustable

Cette commande comporte une boucle interne, la boucle classique processus-correcteur, et une boucle externe comprenant un estimateur (identification des paramètres du processus) et un mécanisme d'adaptation qui minimise l'erreur entre la sortie du processus et son estimation comme le montre la figure III.3.

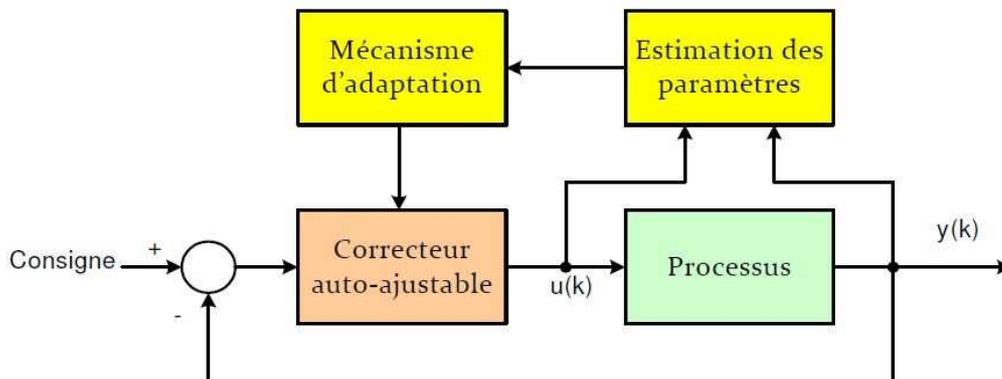


Figure III.3 Commande adaptative à correcteur auto-ajustable

III.3.3. commande adaptative à modèle de référence (CAMR)

Le comportement dynamique du processus est défini par le modèle de référence et les paramètres du correcteur sont ajustés par la boucle externe de façon à minimiser l'erreur de sortie processus-modèle. Pour la description mathématique du modèle de référence et du système ajustable deux méthodes sont généralement utilisées : les équations d'état ou les relations entrée-sortie.

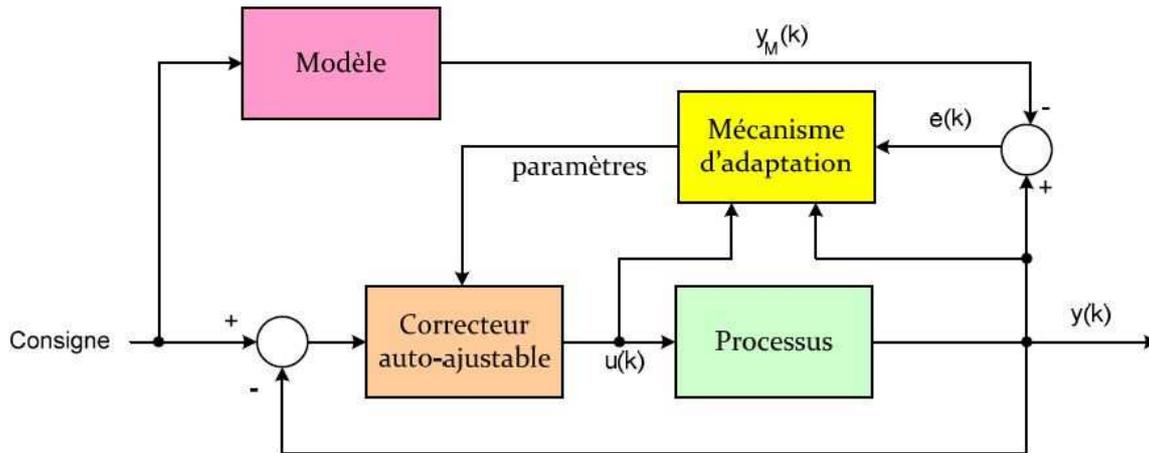


Figure III.4 Commande adaptative à modèle de référence

A l'origine la CAMR traitait les problèmes d'asservissement alors que le correcteur auto-ajustable était destiné aux problèmes de régulation, c'est pourquoi l'aspect de la régulation, pourtant inhérent à tout système de commande, a souvent été ignoré dans les études de CAMR [Merabet Boulouiha, 15].

III.4. Commande adaptative des robots manipulateurs

Le problème de la conception de lois de commande adaptative pour des robots manipulateurs rigides afin d'assurer la poursuite de trajectoires désirées a intéressé les chercheurs depuis plusieurs années. Le développement de contrôleurs adaptatifs efficaces représente une étape importante vers les applications robotiques à grande vitesse/précision. Même dans une installation industrielle bien structurée, les robots peuvent faire face à une incertitude concernant les paramètres décrivant les propriétés dynamiques de la charge de portée (par exemple les moments d'inertie inconnus). Puisque ces paramètres sont difficiles à calculer ou mesurer, ils limitent le potentiel des robots pour manipuler avec précision des objets de taille et de poids considérables. Pour compenser cette incertitude paramétrique, beaucoup de chercheurs ont proposé des stratégies de commande adaptatives. Un avantage de l'approche adaptative est que l'exactitude des charges inconnues de transport d'un manipulateur s'améliore avec le temps.

Dans le cadre de la commande des robots manipulateurs, on peut citer la commande adaptative directe et indirecte. La commande adaptative est dite directe (explicite), si les paramètres du correcteur sont évalués directement, et indirecte (implicite), si les paramètres du correcteur sont calculés après l'estimation des paramètres du processus. [Makhlouf, 15]

III.5. Commande adaptative décentralisée

La commande décentralisée présente un certain nombre d'avantages, à savoir : la minimisation du nombre d'information traitées par les unités de commande, la Simplicité des lois de commande élaborées par rapport au cas centralisé ainsi que l'amélioration de la fiabilité de transfert de données en n'utilisant que l'information locale. L'intérêt majeur de la décentralisation est la simplification de la synthèse et de l'implémentation des régulateurs. Chaque sous-système est commandé par une station de commande locale. Cette dernière n'utilise pas les informations des autres sous-systèmes.

Dans un contexte non adaptatif, la mauvaise identifiabilité des systèmes couplés, causée principalement par leur complexité, explique, en partie, le manque de résultats constaté. C'est pourquoi, l'approche adaptative présente, pour ces systèmes, une solution particulièrement attrayante. Avec une telle méthode, les interactions, mal connues, sont automatiquement prises en compte. [Khenfri, 11] [Madani, 07]

Nous présentons ici une technique de commande adaptative décentralisée qui a prouvée ses performances en simulation ainsi qu'en expérimentation tout en assurant la stabilité du schéma de commande [Seraji, 89][Djebiri, 97]. Cette technique peut être classée dans la commande adaptative à régulateur auto-ajustable (STR). Elle sera ensuite utilisée pour la commande du robot manipulateur

Le schéma de cette commande décentralisée est présenter sure la figure (III.6)

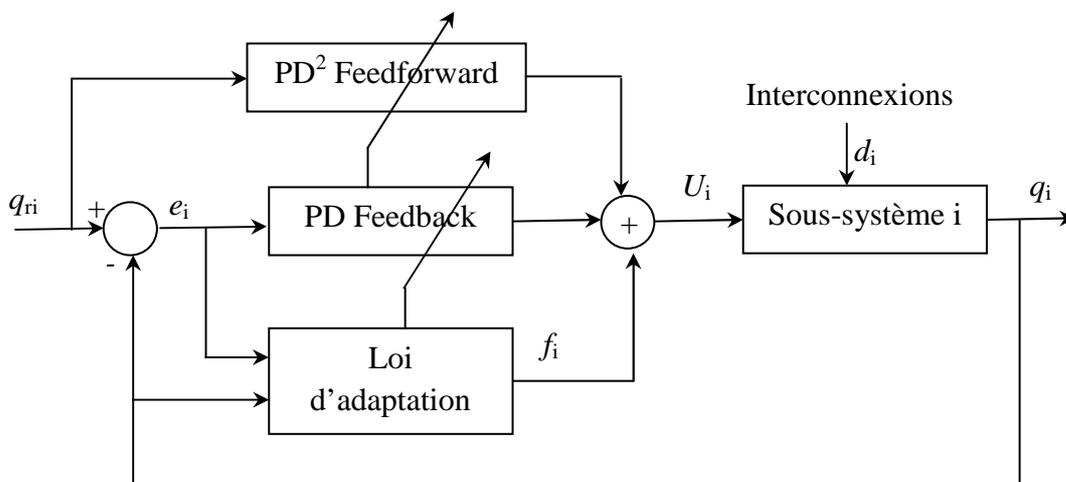


Figure III.5 Schéma de la commande adaptative décentralisée pour le sous-système i

Le régulateur adaptatif indépendant dédié a la commande du sous- système i est décrit par :

$$U_i(t) = f_i(t) + [k_{i0}(t)e_i(t) + k_{i1}(t)\dot{e}_i(t)] + [p_{i0}(t)q_{ri}(t) + p_{i1}(t)\dot{q}_{ri}(t) + p_{i2}(t)\ddot{q}_{ri}(t)] \quad (\text{III.1})$$

Où $e_i(t) = q_{ri}(t) - q_i(t)$ est l'erreur de poursuite en position du sous-système i

$q_{ri}(t)$ Trajectoire désirée

$q_i(t)$ Sortie de sous-système i

Cette loi de commande est composée de trois termes :

1. Le terme $f_i(t)$ qui est un signal auxiliaire génère par le schéma d'adaptation pour améliorer les performances de poursuite et compenser la perturbation d_i
2. Le terme $[k_{i0}(t)e_i(t) + k_{i1}(t)\dot{e}_i(t)]$ dû à un régulateur PD ('feed-back Controller') à gains $k_{i0}(t)$ et $k_{i1}(t)$ adaptatifs
3. Le terme $[p_{i0}(t)q_{ri}(t) + p_{i1}(t)\dot{q}_{ri}(t) + p_{i2}(t)\ddot{q}_{ri}(t)]$ fourni par un régulateur 'feedforward' à gains ajustables

Les lois d'adaptation de ces 3 termes, en vue d'assurer une poursuite asymptotique de la trajectoire désirée, sont basées sur une erreur pondérée $r_i(t)$ définie par :

$$r_i(t) = w_{pi} e_i(t) + w_{vi} \dot{e}_i(t) \quad (\text{III-2})$$

➤ Pour ajuster le signal auxiliaire :

$$f_i(t) = f_i(0) + \delta_i \int_0^t r_i(t) dt + \rho_i r_i(t) \quad (\text{III-3})$$

➤ Pour ajuster les gains du régulateur PD ('feed-back Controller') :

$$k_{ij}(t) = k_{ij}(0) + \alpha_{ij} \int_0^t r_i(t) e_i^{(j)}(t) dt + \beta_{ij} r_i(t) e_i^{(j)}(t), \quad j=0,1 \quad (\text{III-4})$$

➤ Pour ajuster les gains du régulateur 'feedforward' :

$$p_{ij}(t) = p_{ij}(0) + \gamma_{ij} \int_0^t r_i(t) q_{ri}^{(j)}(t) dt + \lambda_{ij} r_i(t) q_{ri}^{(j)}(t), \quad j = 0,1,2 \quad (\text{III-5})$$

Où $\delta_{ij}, \alpha_{ij}, \gamma_{ij}$ constantes positives

$\rho_i, \beta_{ij}, \lambda_{ij}$ constantes positives ou nulles

w_{pi}, w_{vi} constantes positives reflétant l'importance relative des erreurs en position et en vitesse dans l'expression de $r_i(t)$.

Du point de vue implantation, le signal auxiliaire $f_i(t)$ peut être génère par un régulateur PID à gains fixe. En effet, en utilisant les équations (III.2) et (III.3) on obtient :

$$f_i(t) = f_i(0) + \rho_i[w_{pi}e_i(t) + w_{vi}\dot{e}_i(t)] + \delta_i \int_0^t [w_{pi}e_i(t) + w_{vi}\dot{e}_i(t)]dt \quad (III-6)$$

Ou encore :

$$f_i(t) = f_i(0) + [\rho_i w_{pi} + \delta_i w_{vi}]e_i(t) + [\rho_i w_{vi}]\dot{e}_i(t) + [\delta_i w_{pi}] \int_0^t e_i(t)dt \quad (III-7)$$

Ainsi, la loi de commande (III.1) peut être écrite sous forme d'une combinaison d'un régulateur PID ('feed-back Controller') et d'un régulateur PD² ('feedforward Controller') :

$$U_i(t) = U_i(0) + [\bar{k}_{ip} + \bar{k}_{il} \int_0^t dt + \bar{k}_{iv} \frac{d}{dt}] e_i(t) + [p_{i0} + p_{i1} \frac{d}{dt} + p_{i2} \frac{d^2}{dt^2}] q_{ri}(t) \quad (III-8)$$

Où $\begin{cases} \bar{k}_{ip} = k_{i0} + \rho_i w_{pi} + \delta_i w_{vi} \\ \bar{k}_{il} = \delta_i w_{pi} \\ \bar{k}_{iv} = k_{il} + \rho_i w_{vi} \end{cases}$ sont les gains ajustables du PID.

Et $U_i(0) = f_i(0)$

III.6. Résultats de simulation

La technique de commande adaptative décentralisée présentée dans le paragraphe précédent a été appliquée au robot. Le tableau ci-dessous contient les valeurs des constantes utilisées pour implémenter cette technique.

	w_p	w_v	δ	ρ	α_0	α_1	β_0	β_1	γ_0	γ_1	γ_2	λ_0	λ_1	λ_2
Art.1	15	15	500	10	500	500	500	500	10	10	10	1	1	1
Art.2	15	15	500	10	500	500	500	500	10	10	10	1	1	1
Art.3	100	100	500	10	500	500	500	500	10	10	10	1	1	1

Pour évaluer les performances de cette technique de commande, les mêmes trajectoires de références utilisées dans le chapitre précédent sont utilisées ici. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure III.6.

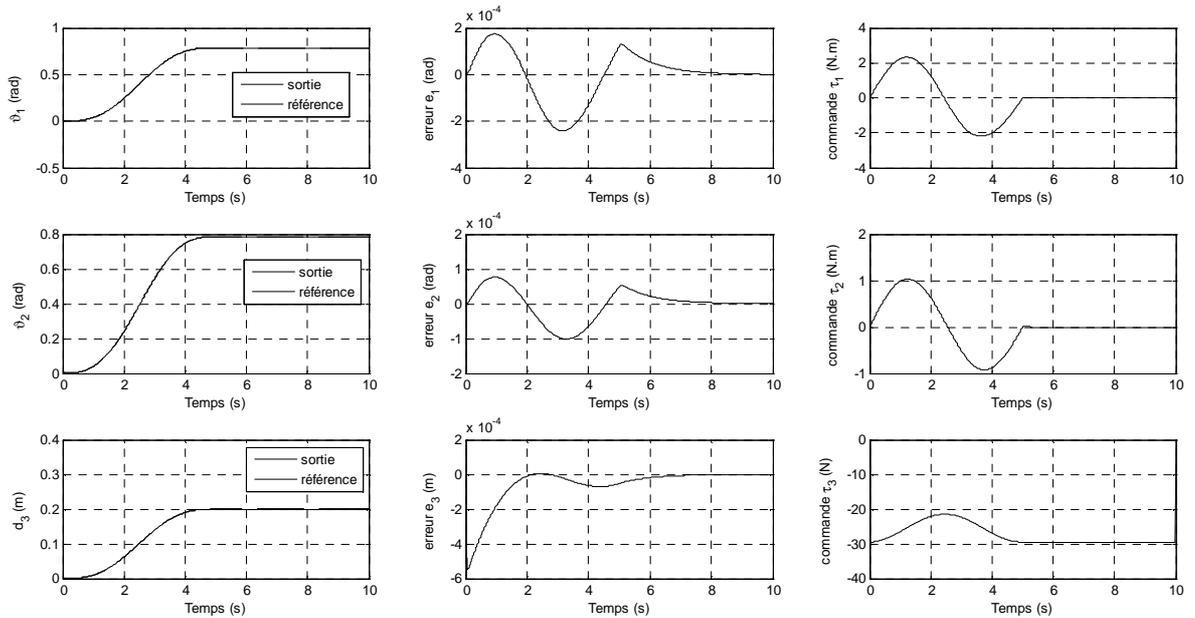


Figure III.6 Résultats de la Commande adaptative décentralisée

Les résultats obtenus montrent clairement les performances du régulateur adaptatif du point de vue poursuite et régulation.

Tests de robustesse du régulateur adaptatif

Pour évaluer la robustesse du régulateur adaptatif synthétisé, nous avons effectué 2 tests :

Test 1 : une perturbation externe sous forme d'un couple résistant d'une valeur égale à 2 N.m qui vient s'opposer au mouvement des articulations 1 et 2 à partir de l'instant 2s. Les résultats sont présentés sur la figure II.7.

Test 2 : une variation paramétrique des coefficients de frottements visqueux des articulations 1 et 2 (de $7 \cdot 10^{-4} \text{ N.m.rad}^{-1} \cdot \text{s}$ les coefficients de frottement deviennent $7 \text{ N.m.rad}^{-1} \cdot \text{s}$). Les résultats sont présentés sur la figure II.8.

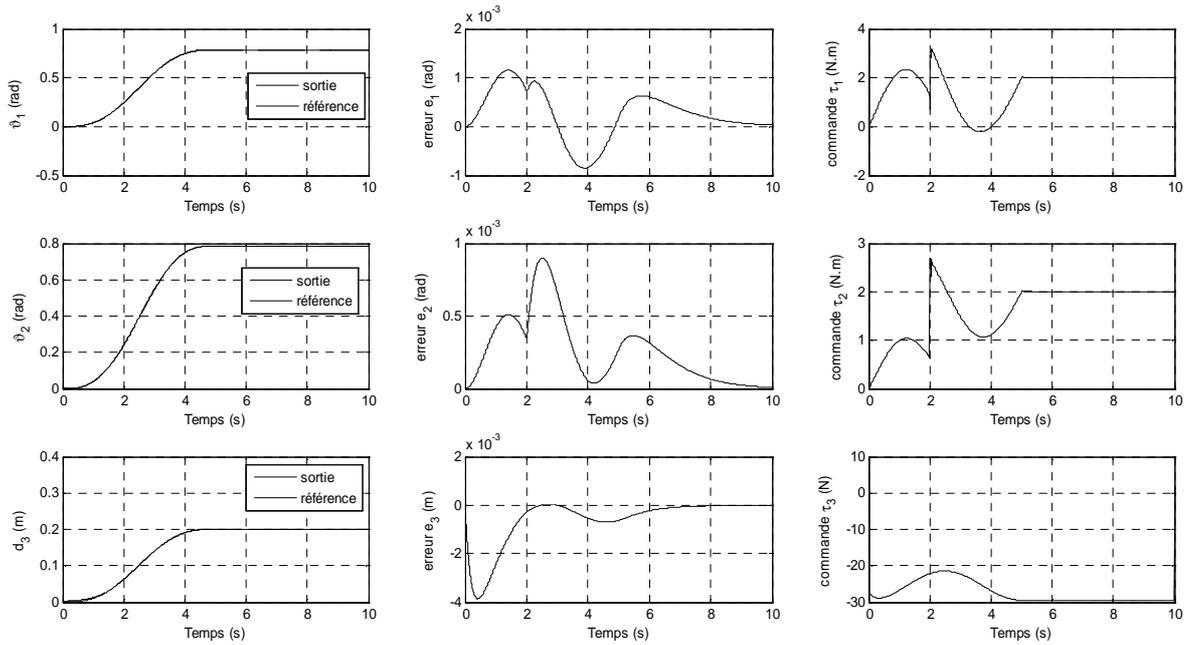


Figure III.7 Commande adaptative décentralisée avec couple résistant à l'instant $t = 2s$

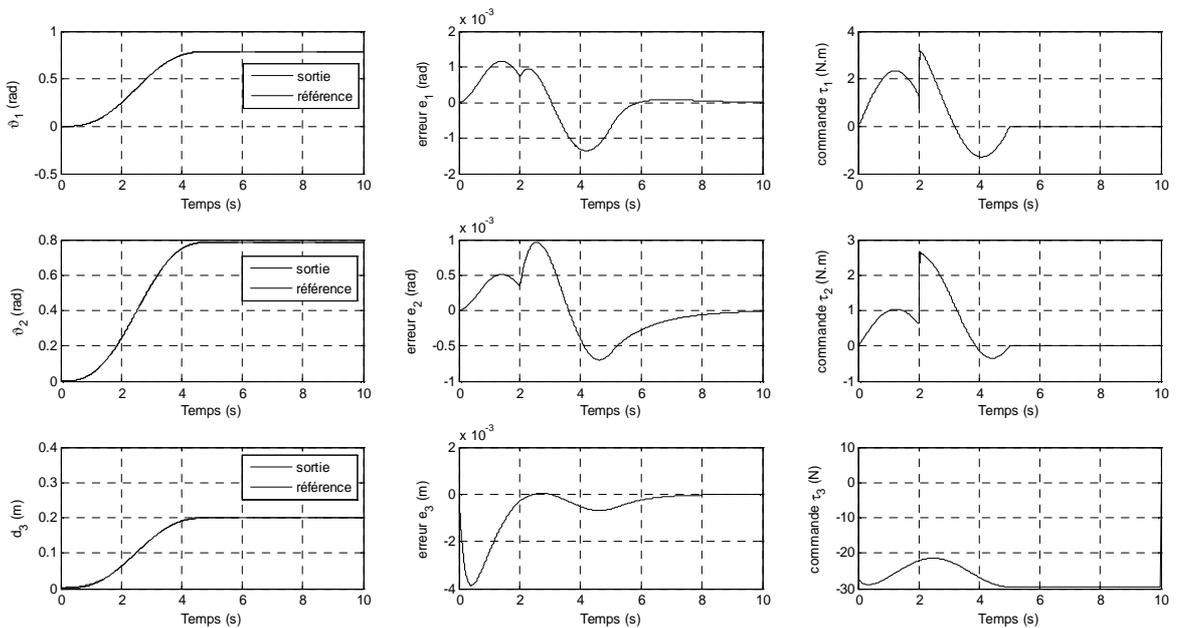


Figure III.8 Commande adaptative décentralisée avec variation paramétrique à l'instant $t = 2s$

Les résultats obtenus montrent le comportement robuste du régulateur synthétisé vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. En effet, l'adaptation en temps réel des paramètres du régulateur, avec un bon choix des constantes utilisées dans sa loi de commande,

permet de faire face au changement inattendu, même à large échelle, des paramètres du robot et son environnement externe.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, et après avoir donné quelques notions sur la commande adaptative et ses différents types, une technique de commande adaptative décentralisée a été présentée puis appliquée au robot. Les résultats de simulation ont montré les très bonnes performances offertes par cette technique du point de vue poursuite, régulation et robustesse.

Le schéma de commande proposé et implémenté dans ce chapitre présente deux avantages très importants. Le premier avantage est sa nature adaptative. Les paramètres du régulateur sont adaptés pour compenser les variations paramétriques dans le modèle dynamique du robot ainsi que les perturbations externes. Le deuxième avantage est sa structure décentralisée ainsi que la loi de commande qui est relativement simple dans sa formulation. Donc du point de vue temps de calcul, le schéma de commande sera très rapide puisque chaque régulateur indépendant destiné à la commande d'une articulation peut être implémenté dans un microprocesseur indépendant.

Conclusion générale

Dans ce travail, la modélisation et la commande d'un robot manipulateur à 3 degrés de liberté ont été exposées. Nous nous sommes intéressés à la classe de robots manipulateurs rigides de type SCARA.

Dans le premier chapitre les différents modèles décrivant le comportement statique et dynamique du robot ont été établis avec une simulation en boucle ouverte du modèle dynamique. Ce dernier joue un rôle très important car il va nous permettre de tester l'efficacité des commandes qui seront appliquées.

L'objectif du deuxième chapitre était de synthétiser un régulateur classique de type PID pour la commande du robot. Ce travail a été fait et les résultats de simulation ont montré de très bonnes performances pour ce régulateur. Ce dernier présente aussi l'avantage de la simplicité de son implantation mais son inconvénient est le risque de dégradation de ses performances si les paramètres du robot ou son environnement changent beaucoup.

Dans le troisième chapitre la commande adaptative du robot a été abordée. Une technique de commande adaptative décentralisée a été présentée et appliquée. Cette technique a deux avantages : son caractère adaptatif donc sa capacité de compenser les variations paramétriques dans le modèle dynamique du robot ainsi que les perturbations externes, et sa structure décentralisée donc la possibilité de commander chaque articulation du robot indépendamment des autres. Les résultats de simulations ont prouvé l'efficacité de cette commande.

Bien que nous n'ayons pas fait une comparaison entre les deux régulateurs car il faut se mettre dans les mêmes conditions pour pouvoir effectuer cette comparaison (Régulateur PID classique à paramètres fixes comparé à un régulateur PID à paramètres adaptatifs), nous pouvons affirmer que la commande adaptative est meilleure que la commande classique car le régulateur adaptatif avec ses gains variables garde des bonnes performances même avec des fortes perturbations et de larges variations paramétriques qui peuvent se manifester dans l'environnement du travail du robot.

Comme perspectives à ce travail nous envisageons :

- L'utilisation d'un modèle dynamique du robot plus précis incluant la dynamique des actionneurs.
- Proposer d'autres techniques de commande (commandes robustes et intelligentes).
- Tester les commandes qui ont prouvé leurs efficacités en simulation sur des bancs d'essais expérimentaux.

- [Adouane, 10] Adouane L., *TP modélisation et commande des robots*, Polytechnique Clermont Ferrand, 2010
- [Ang, 05] Ang K.H., Chong G.C.Y. and Li Y., '*PID control system analysis, design and technology*', IEEE Transactions on control systems technology 13(4), pp. 559-576, 2005
- [Åström, 83] Åström K. J., '*Theory and applications of adaptive control – A survey*', Automatica, Vol. 19, No. 5, pp. 471-486, 1983
- [Bali, 95] Bali N., *Etude des performances de la commande prédictive généralisée : application au robots manipulateurs PUMA et SCARA*, Thèse de Magister, ENP, 1995
- [Chaal, 13] Chaal M., *Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte*, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 2013
- [Djebiri, 97] Djebiri M., *Commande décentralisée supervisée par réseaux de neurones artificiels d'un bras de robot manipulateur*, Mémoire d'Ingénieur, ENP, 1997
- [Guenfai, 95] Guenfai L., *Etude de différentes stratégies de commande adaptative : application à un bras manipulateur*, Thèse de Magister, ENP, 1995
- [Kadri, 14] Kadri A.Y. , *Régulation Automatique*, Programme du module régulation automatique, Université Kasdi Merbah OUARGLA, 2014
- [Khenfri, 11] Khenfri F. et Boudjema F. '*Approche décentralisée pour la commande adaptative à structure variable: Application à un Quadrotor*', International Conference on Electronics & oil ICEO'11, Ouargla, March 01-02, 2011
- [Landau, 11] Landau I.D, Lozano R., M'Saad M. and Karimi A., *Adaptive control: algorithms, analysis and applications*, Springer, 2011
- [Leena, 12] Leena G. and Ray G., '*A set of PID controllers for an n – link robot manipulator*', Sadhana Vol. 37, Part 3, June 2012, pp. 405-423, Indian Academy of science
- [Madani, 07] Madani T. et Benallegue A., '*Commande adaptative décentralisée à structure variable d'une classe de systèmes non-linéaires interconnectés : application à un robot volant*', Revue électronique Sciences & Technologie de l'Automatique, vol. 4, 2007
- [Makhloufi, 15] Makhloufi F., *Modélisation et commande des robots manipulateurs par les outils de l'intelligence artificielle*, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar ANNABA, 2015
- [Maki, 15] Maki K.H, *handbook of research on advancements in robotics and mechatronics*, IGI Global, USA, 2015

- [Merabet Boulouiha, 15] Merabet Boulouiha H., *Notes de cours : techniques de commande avancée*, Centre universitaire Ahmed Zabana de Rélizane, 2014/2015
- [Meziane, 09] Meziane S., *Commande adaptative et prédictive de la machine asynchrone*, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009
- [Paul, 81] Paul R.P., *Robot manipulators: mathematics, programming and control*, MIT Press, Cambridge, MA, 1981
- [Rivoire, 94] Rivoire M. et Ferrier J.-L., *Cours d'automatique, tome2 : asservissement-régulation, commande automatique*, Chihab-Eyrolles, 1994
- [Seraji, 89] Seraji H., '*Decentralized adaptive control of manipulators: theory, simulation, and experimentation*', IEEE Transactions on robotica and automation, vol. 5, No. 2, pp. 183-201, April 1989
- [Sciavicco, 02] Sciavicco L. and Siciliano B., *Modelling and control of Robot manipulators*, Springer-Verlag, London, 2002
- [Siciliano, 10] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L. and Oriolo G., *Robotics: modelling, planning and control*, Springer-Verlag, London, 2010
- [Slotine, 91] Slotine J.-J. E. and Li W., *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall. Inc., USA, 1991
- [Vibet, 87] Vibet C., *Robots: principes et contrôle*, Ellipses, Paris, 1987.