

REPUBLIQUE ALGRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme

Master académique en Automatique
Option commande des systèmes

Thème

Conception, modélisation et commande par couple calculé flou d'un robot manipulateur cylindrique à trois degrés de liberté.

Membre de jury :

Encadreur : **Mr Amar HAMACHE** (MCA, ESSA-Alger)

President: **Mr R. MELLEH** (MCA, UMMTO)

Examination: **Mr M. ALLED** (MAA, UMMTO)

Examineur : **Mme KH. KHERRASE** (MCB, UMMTO)

Soutenu le : 28/09/2017

Présenté par :

CHALAH Dalila

BENABDERHIM Radia

Promotion 2017

Remerciements

Nous remercions Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et le force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés à travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

*Nos sincères remerciements envers notre cher promoteur **Mr A.HAMACHE** Maitre de conférence C A à ESST à Algie, pour ses conseils constructifs, sa disponibilité et son soutien durant tout le long de l'élaboration de ce mémoire malgré ses obligations professionnelles.*

*Nous ne manquerons pas de remercier **Mme O.HAMDOUS** qui nous a été d'une grande utilité.*

*Nous remercions **Mr A.DIRAMI** pour ses conseils et son soutien.*

Nos profondes gratitudes, d'avance aux membres du jury qui feront l'honneur d'évaluer ce travail de fin d'études.

Tous nos infinis remerciements vont à tous les enseignants qui ont contribués à notre formation durant notre cursus (1998-2017), pour le riche savoir qu'ils nous ont transmis avec rigueur et dévouement.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance envers toute notre famille, tous nos cousins, amis, camarades et envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail ne serait ce par un modeste sourire d'encouragement à notre égard.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *Mes chers parents.*
- ❖ *Mes beaux-parents.*
- ❖ *Mes grands-parents.*
- ❖ *Mon cher fiancé.*
- ❖ *Mes chers frères et chères sœurs.*
- ❖ *Mon cher beau-frère et chère belle-sœur.*
- ❖ *Mes cousins(es).*
- ❖ *Mes amis(es).*

A toute personne qui porte de l'estime pour moi.

CHALAH. Dalila

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *Mes chers parents.*
- ❖ *Mes beaux-parents.*
- ❖ *A la mémoire de ma chère grande mère que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.*
- ❖ *Mon cher fiancé.*
- ❖ *Mes chers frères et chères sœurs.*
- ❖ *Mes chers beaux-frères et chères belles-sœurs.*
- ❖ *Mes cousins(es).*
- ❖ *Mes amis(es).*

A toute personne qui porte de l'estime pour moi.

BENABDERHIM. Radia

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : manipulateur cartésien 3ddl.....5

Figure 1.2 : manipulateur cylindrique 3ddl.5

Figure 1.3 : manipulateur sphérique 3ddl.6

Figure 1.4 : manipulateur SCARA à 3 ddl.....7

Figure 1.5 : Manipulateur anthropomorphe7

Figure 1.6 : Robot à structure série.9

Figure 1.7 : Robot à structure parallèle.10

Figure 1.8 : Composantes d'un système robotique.11

Figure 1.9 : Coordonnées opérationnelles d'un point.....14

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Géométrie de la structure articulée du robot HC.....16

Figure 2.2 : Apposition des repères au robot dans sa configuration initiale.....17

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Trajectoire désirée.....29

Figure 3.2 : Loi horaire de type Bang-Bang avec palier de vitesse du paramètre de balayage.33

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : Schéma de commande par couple calculé dans l'espace articulaire.....37

Figure 4.2 : Réponse du système en situation normale ($s= 19.05\%$).....40

Figure 4.3 : Réponse du système en situation de défaillance ($s=54.45\%$).....42

Figure 4.4 : Structure générale d'un système flou.....46

Figure 4.5 : Structure du système flou.....48

Figure 4.6 : Fonctions d'appartenance associées aux entrées et sorties du système flou.49

Figure 4.7 : Réponse du système en situation de défaillance ($s= 27.96\%$).....51

Résumé :

Le présent travail traite la problématique de la conception, modélisation et commande d'un robot manipulateur PRP cylindrique.

D'abord les différents modèles du robot sont établis (modèle géométrique, modèle cinématique et modèle dynamique direct et inverse), suivis de la planification de la tâche à réaliser où les différentes grandeurs opérationnelles de références à savoir la position, la vitesse, l'accélération sont générés. En suite, l'utilisation deux techniques de commande, avec une même loi de commande synthétisée et appliquée (méthode du couple calculé conventionnelle, méthode du couple calculé flou).

L'analyse des résultats de simulation obtenus dans les deux techniques : conventionnelle et par la logique floue, révèlent à l'absence des perturbations une bonne performance en poursuite de trajectoire désirée et de robustesse. Cependant, vu les perturbations et la complexité flagrante du modèle dynamique, celle-ci est rendue très sensible aux incertitudes de modélisations. L'utilisation d'un système flou pour cette commande est capable de maintenir des performances acceptables.

Mots clés :

Robot SCARA, notion de robot, Modélisation et commande d'un Robot.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la robotique	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Types de robots	4
1.2.1. Les robots manipulateurs.....	4
1.2.1.a. Manipulateur cartésien	4
1.2.1.b. Manipulateur cylindrique.....	5
1.2.1.c. Manipulateur sphérique	6
1.2.1.d. Robots manipulateurs SCARA	6
1.2.1.e. Manipulateur anthropomorphe.....	7
1.2.2. Les robots mobiles.....	8
1.3. Types de structures	9
1.3.1. Structure série	9
1.3.2. Structure parallèle	9
1.3.3. Robots hybrides.....	10
1.4. Composantes d'un système robotique.....	10
1.4.1. Architecture des robots	11
1.4.2. Structure interne d'un système robotique.....	11
1.5. Caractéristiques d'un robot	12
1.6. Degré de liberté et redondance.....	13
1.7. L'espace articulaire ou généralisé.....	13
1.8. L'espace cartésien ou opérationnel	14
1.9. Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Conception et modélisation de la structure mécanique articulée	
2.1. Introduction.....	15
2.2. Structure du robot étudié	15
2.3. Appositions des repères	16
2.4. Paramètres de Denavit-Hartenberg de la structure articulée	17
2.5. Matrices de transformation homogène entre repères	18

2.6. Modèles géométriques direct et inverse	19
2.7. Modèles cinématiques direct et inverse.....	20
2.8. Modèle dynamique.....	22
2.8.1. Energie potentielle du robot	23
2.8.2. Energie cinétique du robot	24
2.8.3. Formalisme d'Euler Lagrange	27
2.9. Conclusion.....	28

Chapitre 3 : Planification de la tâche et génération de la trajectoire de référence

3.1. Introduction.....	29
3.2. Définition de la trajectoire	29
3.3. Génération de la trajectoire désirée	29
3.4. Evolution du paramètre θ par la loi horaire de type Bang-Bang avec palier de vitesse.....	30
3.5. Génération de la trajectoire	33
3.6. Conclusion	34

Chapitre 4 : Commande par couple calculé flou en poursuite de la trajectoire

4.1. Introduction	35
4.2. Cahier des charges	35
4.3. Techniques de commande classiques.....	35
4.3.1. Commande adaptative	35
4.3.2. Commande fondée sur la fonction de Lyapunov.....	35
4.3.3. Commande passive.....	35
4.3.4. Commande prédictive.....	36
4.4. Commande par couple calculé (<i>computed torque</i>)	36
4.5. Synthèse de la loi de commande de par couple calculé.....	36
4.6. Commande par couple calculé flou (<i>Fuzzy Computed Torque Control</i>).....	42
4.6.1. Logique floue	43
4.6.2. Mise en forme des entrées ou normalisation	44
4.6.3. Fuzzification	44
4.6.4. Traitement des prémisses composées.....	45
4.6.5. Inférence floue.....	45

4.6.6. Agrégation des règles.....	45
4.6.7. Défuzzification.....	45
4.6.8. Dénormalisation.....	46
4.6.8. Dénormalisation.....	46
4.6.10. Commande par couple calculé flou.....	47
4.7. Conclusion.....	51
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	55

Introduction générale

La robotique industrielle a répondu dans un premier temps au besoin de manipuler de manière répétitive et automatique des objets entre les machines de fabrication proprement dite. Ce robot devait donc avoir au minimum un organe de saisie des pièces pouvant suivre des trajectoires programmables. Le robot industriel est maintenant un produit majeur et répandu à plus d'un million d'exemplaires, utilisé dans de nombreuses étapes de fabrication (manipulation, peinture, soudure) ; il est complété maintenant dans le domaine manufacturier par des robots mobiles de transport ou d'assistance (picking, assistance au montage) qui ont beaucoup de points communs avec les robots de service. La robotique est par ailleurs considérée comme un élément clé de la compétitivité des entreprises industrielles, au point de susciter des soutiens publics massifs.

Un robot est une machine équipée de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il en a. Les robots sont largement utilisés dans les environnements industriels pour le transport de produits par exemple. Le plus souvent ces tâches sont répétitives et suivent un chemin bien défini, parfois même bien matérialisé comme des lignes sur le sol. Il y a actuellement une forte tendance à élargir les milieux où évoluent les robots à des environnements de bureaux ou à des environnements domestiques (robots de service). Les types d'applications possibles sont innombrables. Cela peut être des tâches de nettoyage et d'entretien ou encore une assistance à une personne handicapée dans des tâches d'exploration et de préhension [1].

La commande d'un bras manipulateur nécessite d'établir la modélisation géométrique, cinématique et dynamique du bras, afin de permettre le passage entre l'espace articulaire propre au robot et l'espace opérationnel propre à la tâche. La tâche à réaliser par le robot doit être planifiée et la trajectoire opérationnelle générée pour alimenter le système de commande en référence de position, vitesse et accélération.

Pour réaliser la tâche tout en respectant le cahier des charges, on doit générer le signal de commande à envoyer aux actionneurs du robot. Certaines de ces tâches sont délicates et exigent une très grande précision avec une dynamique et une évolution souvent très rapide. Cela justifie le parcours des roboticiens aux techniques de commande moderne dont la méthode du couple calculé floue considérée comme étant une approche idéale.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités et quelques notions de base sur la robotique industriel, suivies des définitions des notions relatives aux robots manipulateurs pour une meilleure compréhension de ce type de mécanismes.

Deuxième chapitre est consacré à la conception et la modélisation de la structure mécanique articulée du robot HC, suivie de sa modélisation géométrique, cinématique, dynamique direct et inverses.

Le troisième chapitre consiste à faire la planification de trajectoire dans l'espace tout en déduisant les grandeurs opérationnelles de référence à savoir la position, la vitesse et l'accélération, ainsi qu'un programme réalisé sous MATLAB pour vérifier les résultats obtenus de notre planification.

Le quatrième chapitre exposera la théorie de la commande par couple calculé classique puis assisté par un système flou, en utilisant le modèle dynamique établi au deuxième chapitre.

Les résultats de simulation du système avec discussion seront donnés dans le cas où le robot est piloté par les deux lois de commande puis seront comparés.

Le mémoire ce terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

1.1. Introduction :

Sans remonter aux premiers concepts de machines remplaçant l'homme dès le XVIIe siècle, la robotique est née dans les années 1950, du croisement des besoins et des disponibilités de nouvelles technologies développées durant la seconde guerre mondiale : l'électronique, l'automatique, l'informatique...etc. Les deux premières orientations de ces machines étaient de répondre aux besoins de l'industrie manufacturière et aux besoins de l'industrie en milieux hostiles à l'homme.

Le robot a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce R.U.R. (Rossum's Universal Robots). Il provient du tchèque "rabota" qui signifie corvée ou travail obligatoire. Le terme robotique a été employé pour la première fois par Asimov en 1941 [2].

C'est un système mécanique doté d'actionneurs et commandé par un ordinateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches, d'une manière plus ou moins autonome il perçoit son environnement et utilise cette information pour planifier une action dans le but d'atteindre un objectif préfixé. C'est une science pluridisciplinaire qui comprend (la mécanique, l'automatique, l'électrotechnique, le traitement du signal, l'informatique, communication...etc.)

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

Différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. La conception mécanique du bras manipulateur a une influence sur le choix du schéma de commande. Un robot manipulateur est une structure mécanique complexe dont les inerties, par rapport aux axes des articulations, varient non seulement en fonction de la charge mais aussi en fonction de la configuration, des vitesses et de l'accélération. La plupart des robots utilisent des servomoteurs électriques comme actionneurs.

Les caractéristiques des servomoteurs ont un rôle important pour la sélection du système de commande. Quand le robot utilise des servomoteurs avec de faibles rapports de réduction, les boucles de commande doivent compenser les effets des variations des forces d'inertie et de gravité en fonctions de la configuration. Les lois de commande basées sur les modèles dynamiques des robots (appelée commande dynamique) donnent de très bons résultats dans ce cas. Ils permettent de maintenir la réponse dynamique du système vérifiant certains critères de performance. En utilisant ce type de techniques, les robots peuvent évoluer à grandes vitesses.

En effet la majorité des tâches confiées aux robots sont délicates et exigent une très grande précision pour des trajectoires rapides. Dans ce cas, le type de commande nécessaire est la commande par découplage non linéaire, méthode qui est considérée comme la solution théorique idéale pour la commande de ce type de systèmes [3].

1.2. Types de robots :

Il existe deux types des robots : les robots manipulateurs et les robots mobiles.

1.2.1. Les robots manipulateurs :

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

Les robots manipulateurs sont ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise ou répétitive.

1.2.1.a. Manipulateur cartésien :

- 3 articulations prismatiques dont les axes sont typiquement mutuellement orthogonaux (PPP); 3 DDL

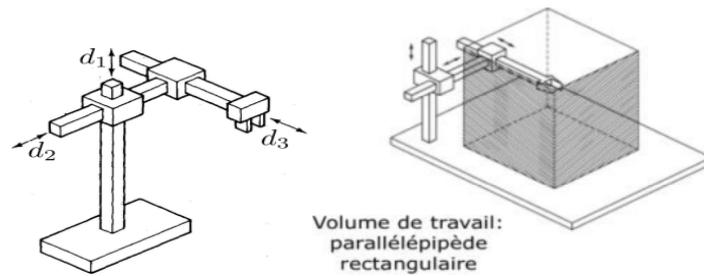


Figure 1.1 : manipulateur cartésien 3ddl.

- La structure cartésienne offre une très bonne rigidité mécanique et une grande précision.
- Cependant, la structure présente une faible dextérité car toutes les articulations sont prismatiques.
- Utilisation typique : manutention et assemblage.
- Actionneurs: généralement électriques, parfois pneumatique.

1.2.1.b. Manipulateur cylindrique :

- La géométrie cylindrique diffère de la géométrie cartésienne en ce que la 1^{ère} articulation prismatique est remplacée par une articulation rotoïde (RPP); 3 DDL.
- La structure cylindrique offre une très bonne rigidité mécanique.
- L'articulation prismatique horizontale permet à l'organe terminal d'accéder à des cavités horizontales.
- Utilisation typique : transport d'objets, même de grande taille (dans un tel cas, des moteurs hydrauliques sont préférés aux moteurs électriques).

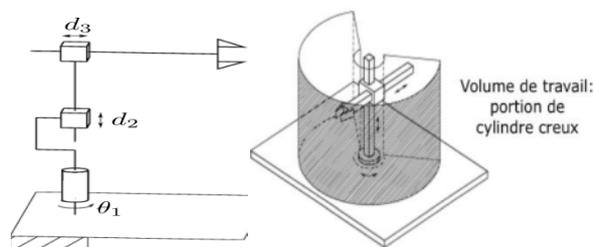


Figure 1.2 : manipulateur cylindrique 3ddl.

1.2.1.c. Manipulateur sphérique :

- La géométrie sphérique diffère de la géométrie cylindrique en ce que la 2^{ème} articulation prismatique est remplacée par une articulation rotoïde (RRP); 3 DDL.
- La rigidité mécanique est inférieure à celle des deux manipulateurs précédents et la construction mécanique est plus complexe.
- Le volume de travail peut comprendre la base de support du robot, ce qui permet la manipulation d'objets sur le plancher.
- Utilisation typique: usinage.

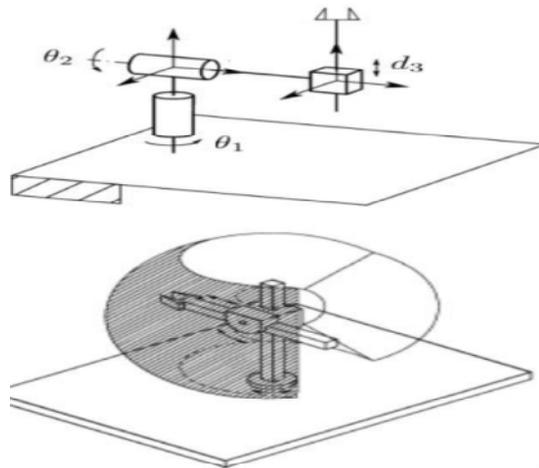


Figure 1.3 : manipulateur sphérique 3ddl.

1.2.1.d. Robots manipulateurs SCARA :

Scara : Sélective Complaisance Assembly Robot Arm.

- Manipulateur sphérique à géométrie spatiale.
- 2 articulations rotoïdes et 1 articulation prismatique (RRP) : tous les axes sont parallèles ; 3 DDL.
- Rigidité élevée pour charges verticales et souplesse aux charges horizontales.
- Bien adapté à des tâches de montage vertical et à la manipulation de petits objets.
- Précis et très rapide (1^{er} modèle : 1981).

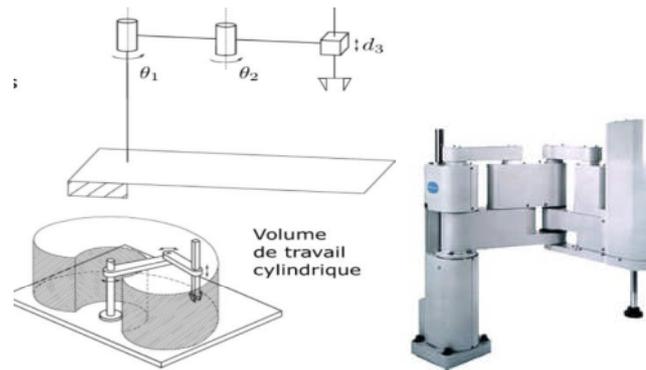


Figure 1.4 : manipulateur SCARA à 3 ddl.

1.2.1.e. Manipulateur anthropomorphe :

- 3 articulations rotoïdes (RRR) : l'axe de la 1^{ère} articulation est perpendiculaire aux axes des deux autres qui sont parallèles ; 3 DDL.
- En raison de sa ressemblance avec le bras humain, la 2^{ème} articulation est appelée l'articulation de l'épaule et la 3^{ème}, l'articulation du coude puisqu'elle relie le bras à l'avant-bras.
- Le manipulateur plus agile car toutes les articulations sont rotoïdes.
- Grand volume de travail par rapport à l'encombrement du robot.
- Large gamme d'applications industrielles.

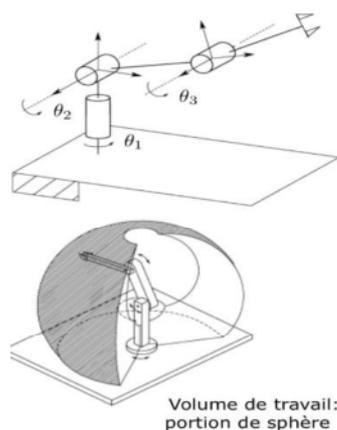


Figure 1.5 : Manipulateur anthropomorphe.

Exemple de robots manipulateurs :

➤ **Robots industriels :**

Ils sont les premiers à avoir été produits en grand nombre. Ils se trouvent plus particulièrement sur les chaînes de montage, et le plus souvent dans l'industrie automobile. Il existe des robots soudeurs, de démolition, de nettoyage, d'emballage ou de surveillance.

➤ **Robots chirurgicaux :**

Ils ont fait une autre branche de robots industriels. Ils fonctionnent soit par bras mécaniques reliés à un ordinateur, soit par bras articulés dirigés par le chirurgien et dont les mouvements sont reproduits en même temps.

1.2.2. Les robots mobiles :

Les robots mobiles sont des robots capables de se déplacer dans un environnement. Ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation [4].

Exemples de robots mobiles :

➤ **Robots domestiques :**

Ils peuvent accomplir de multiples tâches ou simplement nous divertir. Plusieurs sociétés ont créés une tondeuse à gazon automatique qui, sur un périmètre donné, peut éviter les obstacles tout en taillant le gazon. Pour nous divertir, une marque très connue, a conçu un robot chien nommé Aibo. La version la plus récente possède des fonctionnalités très avancées telles que l'appareil photo et la reconnaissance vocale.

➤ **Robots militaires :**

Ils sont principalement utilisés pour la surveillance dans les airs comme dans la mer. Il existe un avion américain sans pilote qui surveille, reconnaît, identifie ou même détruit des cibles ennemies. Il y a également un sous-marin qui a les mêmes propriétés [5].

1.3. Types de structures :

On peut dénombrer deux types de structures mécaniques assurant la motricité :

1.3.1. Structure série :

La plupart des robots industriels construits à ce jour sont de type série, c'est-à-dire que leur structure mobile est une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté. Chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents. Cependant en chaîne fermée, l'un des différents membres de la base possède un degré de connexion supérieur ou égal à trois.

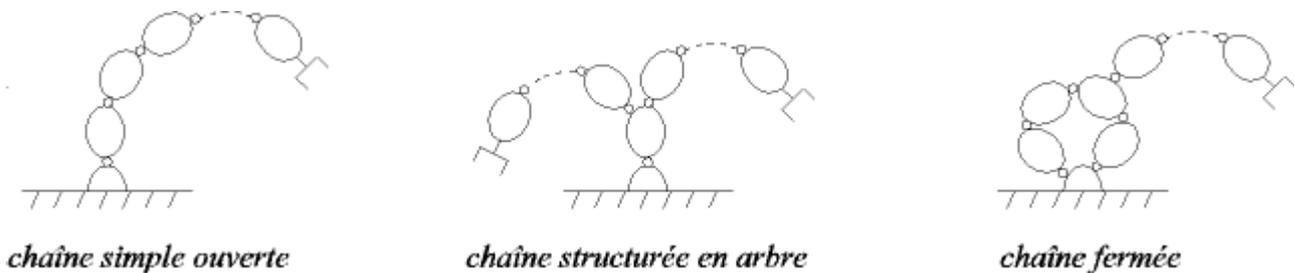


Figure 1.6 : Robot à structure série.

Les robots séries possèdent l'avantage de disposer d'un grand volume de travail et d'être relativement simples sur le plan des calculs liés à leur commande.

1.3.2. Structure parallèle :

Un manipulateur parallèle est un mécanisme en chaîne cinématique fermée, dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes. En effet, ce type d'architecture implique que chaque axe motorisé supporte le suivant. Les masses en mouvement sont donc élevées, ce qui pénalise les performances dynamiques.

Les robots parallèles sont de plus en plus utilisés, ils seront présentés comme étant une solution aux limitations des robots séries. Leurs performances dynamiques élevées ainsi que leurs capacités de charge importantes sont avantageusement mises à profit dans le monde industriel.



Figure 1.7 : Robot à structure parallèle.

1.3.3. Robots hybrides :

C'est un mécanisme qui comporte plusieurs chaînes cinématiques reliant le bâti à l'organe terminal et dont une des chaînes au moins comporte plus d'actionneurs. Parmi les machines hybrides que l'on a cataloguées, on peut distinguer deux catégories :

- les mécanismes à porteur parallèle et poignet série.
- les mécanismes à porteur série et poignet parallèle.

1.4. Composantes d'un système robotique :

a - Mécanisme : structure plus ou moins proche de celle du bras humain, on dit aussi manipulateur quand il ne s'agit pas d'un robot mobile. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leur mouvement aux articulations par des systèmes appropriés.

b- Perception : permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des capteurs dits « proprioceptifs » lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (position et vitesses des articulations) ou « extéroceptifs » lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, mesure de distance, vision artificielle).

c - Commande : qui synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs. A partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur, elle permet d'engendrer les actions du robot.

d- Interface homme-machine : à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter.

e- **Poste de travail et dispositifs pré-robotiques** : qui constituent l'environnement dans lequel évolue le robot.

1.4.1. Architecture des robots :

Un robot comporte deux parties essentielles :

a- **Porteur** : Structure mécanique articulée constituée des 3 premiers degrés de liberté à partir du bâti. Si P est un point de l'extrémité et R_0 un repère lié au bâti, le rôle du porteur est de fixer la position de P dans R_0 . Les liaisons utilisées sont des liaisons pivot notées R ou prismatique notées P, Ainsi le nombre de combinaisons possibles est huit.

b- **Poignet** : il est destiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot

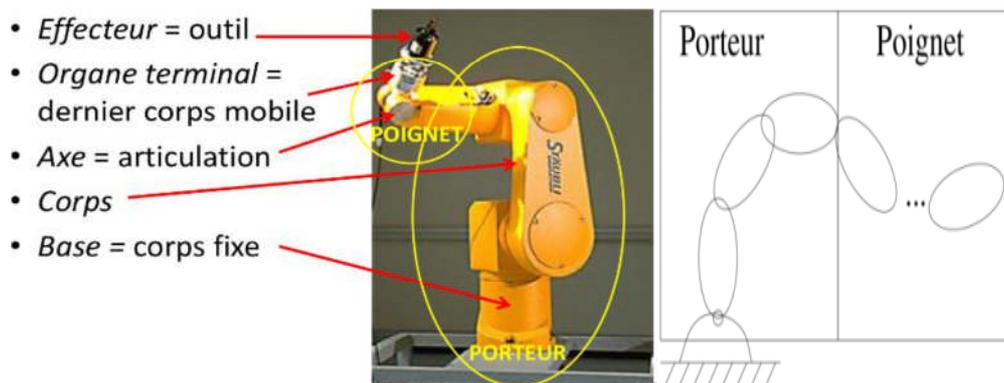


Figure 1.8 : Composantes d'un système robotique.

1.4.2. Structure interne d'un système robotique :

➤ **Capteurs** : Il permet d'avoir une information nécessaire pour l'accomplissement de la tâche, elle est réalisée par deux types des capteurs.

- **Capteur proprioceptif** : permettent d'avoir une information sur l'état interne du robot l'angle de l'articulation sur un bras manipulateur ou le nombre de tours de roue sur un robot mobile.
- **Capteur extéroceptif** : permettent de connaitre la situation du robot par rapport à son environnement.

- **Actionneurs** : Ce sont des mécanismes qui permettent à /aux effecteur(s) d'exécuter une action, de convertir les commandes logicielles (Software) en mouvements physiques ; leur but primaire est de produire assez de force pour provoquer le mouvement du robot, celle-ci représente la transformation d'une énergie source en énergie mécanique, La technologie des actionneurs est étroitement liée à l'énergie de base utilisée (pneumatique, hydraulique ou électrique).
- **Effecteurs** : Ce sont tous les mécanismes à travers lesquels le robot peut effectuer des changements relatifs à l'environnement ; ces changements se font grâce aux actionneurs.
- **Régulateur** : Il récupère l'information sensorielle (par des capteurs), prend des décisions intelligentes par rapport aux actes à accomplir, et effectue ces opérations en envoyant les commandes adéquates aux actionneurs [6].

1.5. Caractéristiques d'un robot :

Les robots se caractérisent notamment par les performances suivantes :

- **Volume accessible par l'outil du robot** : c'est le volume de travail du robot qui dépend de la géométrie et la cinématique du robot, la longueur des segments, le débattement des articulations (limité par des butées).
- **Précision de positionnement** : Le positionnement du robot est soumis à de nombreuses erreurs : erreurs de mesure (quantification, erreurs sur le zéro), flexibilités, erreurs dans la modélisation géométrique du robot (longueurs, ...).
- **Le positionnement absolu** : est en général mauvais (un à plusieurs millimètres).
- **La répétabilité est bien meilleure (d'un ordre au moins)** : c'est la précision de reproduction d'un mouvement répété plusieurs fois avec la même charge. C'est le paramètre adapté lorsque l'on considère des cycles répétitifs avec une programmation par apprentissage.
- **L'atteignabilité** : c'est la capacité d'atteindre un point.
- **Performances dynamiques** :
 - **Vitesse maximale** :
 - la vitesse maximale au niveau des articulations à un sens.
 - les constructeurs donnent souvent la vitesse maximale en bout de bras, dans la configuration la plus favorable.

- **Capacités d'accélération :**
 - Déterminées à partir des couples nominaux des moteurs et du modèle dynamique du robot.
 - Dépendent de la charge et de la configuration.
 - Dépend fortement de l'inertie donc de la position du robot.

- **Charge utile :** C'est la charge maximale que peut porter le robot sans dégrader la répétabilité et les performances dynamiques (précision, vitesse max, ...) sont garanties quelle que soit la position de robot.
 - La charge utile est nettement inférieure à la charge maximale que peut porter le robot qui est directement dépendante des actionneurs.

Spécifiée par une masse et une distance maximale entre le « centre outil » et le centre de gravité de la charge (influence des moments) [7] [4].

1.6. Degré de liberté et redondance :

Le positionnement complet d'une pièce ou de l'effecteur dans l'espace nécessite six paramètres indépendants, appelés degrés de liberté. Parmi les différents choix possibles de ces paramètres, les plus courants sont les trois coordonnées cartésiennes pour positionner un point de la pièce et les trois angles pour orienter cette pièce. Pour qu'un robot fonctionne parfaitement, il est nécessaire qu'il ait six degrés de liberté, c'est-à-dire six axes motorisés.

Un robot est redondant si le nombre d'articulations est supérieur au nombre de degrés de liberté de la tâche à réaliser (espace opérationnel).

D'une manière générale, la redondance, propriété voulue par le concepteur, serait utile pour la réalisation d'une tâche sous contrainte, par exemple : optimisation d'un critère donné (économie d'énergie, distance d'un obstacle...) [8].

1.7. L'espace articulaire ou généralisé :

L'espace articulaire est celui dans lequel est représentée la position de tous les corps du robot. La solution la plus simple consiste à utiliser les variables ou coordonnées articulaires. Sa dimension est égale au nombre de variables articulaires indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique articulée.

1.8. L'espace cartésien ou opérationnel :

L'espace opérationnel d'un robot est celui dans lequel est représentée la position de l'organe terminal (point P). La dimension de l'espace cartésien est le nombre de degrés de liberté maximum que peut avoir l'organe terminal et est égal au nombre de paramètres indépendants nécessaires à la description de la situation de l'organe terminal dans l'espace. On représente les coordonnées d'un point dans l'espace cartésien par le vecteur :

$$p = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

Avec la représentation graphique (**figure 1.9**) du point P [9].

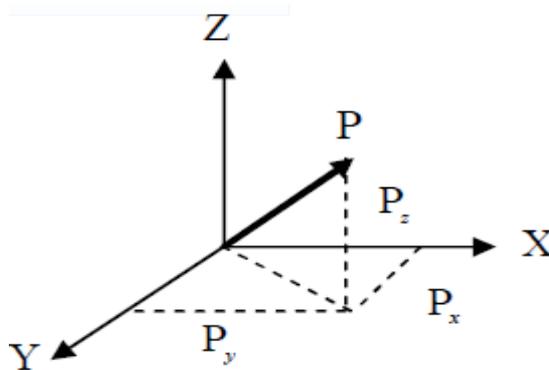


Figure 1.9 : Coordonnées opérationnelles d'un point.

1.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une introduction sur les robots manipulateurs industriels, les différents types et les caractéristiques relatifs à ces derniers. Ainsi, la définition de quelques notions générales relatives aux mécanismes des robots manipulateurs, en se focalisant sur les notions d'espace articulaire, espace cartésien, degré de liberté et redondance.

Dans ce qui suit, nous allons établir les différents modèles pour décrire les mouvements des articulations d'un manipulateur et de calculer les modèles correspondants à la structure articulée HC proposée (modèles : géométrique, cinématique et dynamique).

2.1. Introduction :

Pour commander ou simuler le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer des modèles mathématiques adéquats. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche à réaliser dans les deux espaces (articulaire et opérationnel) et les performances recherchées. Les modèles nécessaires sont :

- a- les modèles géométriques directs et inverses qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- b- les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment, respectivement, les vitesses de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.
- c- le modèle dynamique (la plus part de temps inverse) définissant les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces développés par les actionneurs et les positions, vitesse et accélération des articulations.

Dans ce projet, nous allons étudier la structure articulée d'un bras HC en vue d'établir ses différents modèles puis tester son fonctionnement par simulation.

2.2. Structure du robot étudié :

Il s'agit d'un bras manipulateur cylindrique à trois degrés de liberté de type **PRP**, constitué de trois articulations telles que représenté à la **Figure 2.1** :

Le robot baptisé **HC** est constitué de trois segments actionnés par trois moteurs : le premier et le troisième sont linéaires et servent à la translation des articulations prismatiques art.1et art.3, et le deuxième moteur est rotatif servant à la rotation de l'articulation rotoïde art.2.

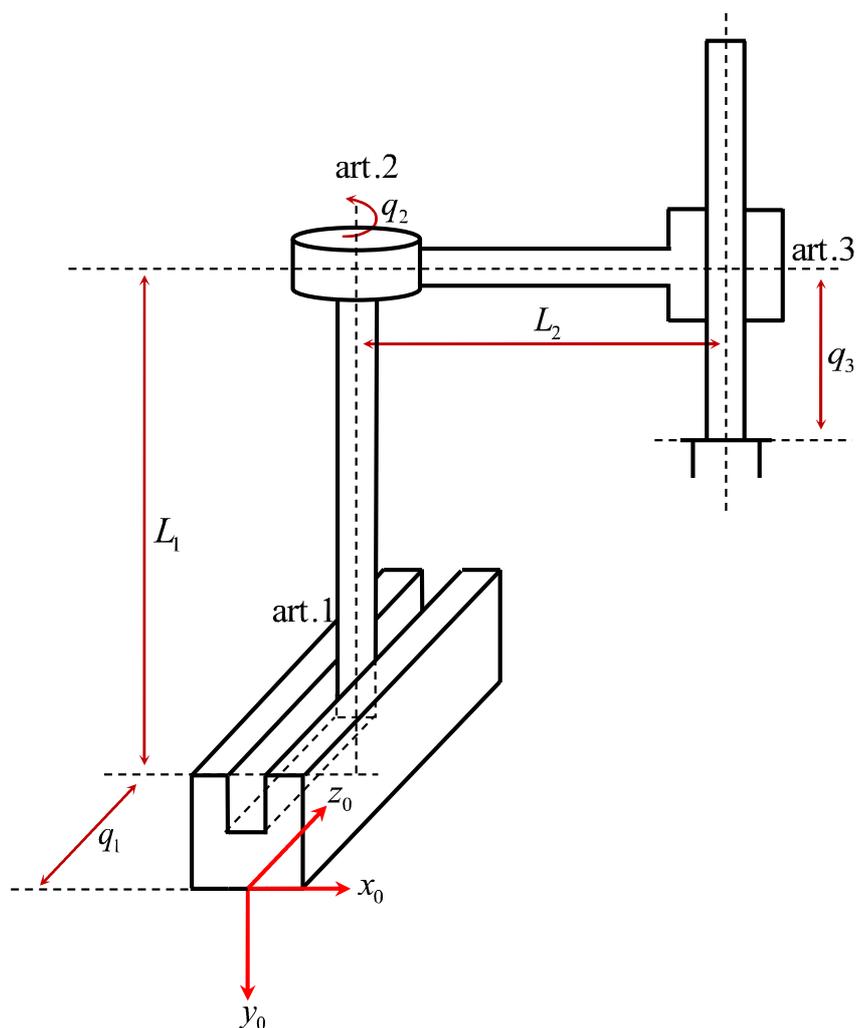


Figure 2.1 : Géométrie de la structure articulée du robot HC.

2.3. Appositions des repères :

Pour l'établissement du MGD, les repères associés aux différentes articulations du robot sont apposés selon la convention de Spong [10] telles que représenté à la **Figure 2.2** :

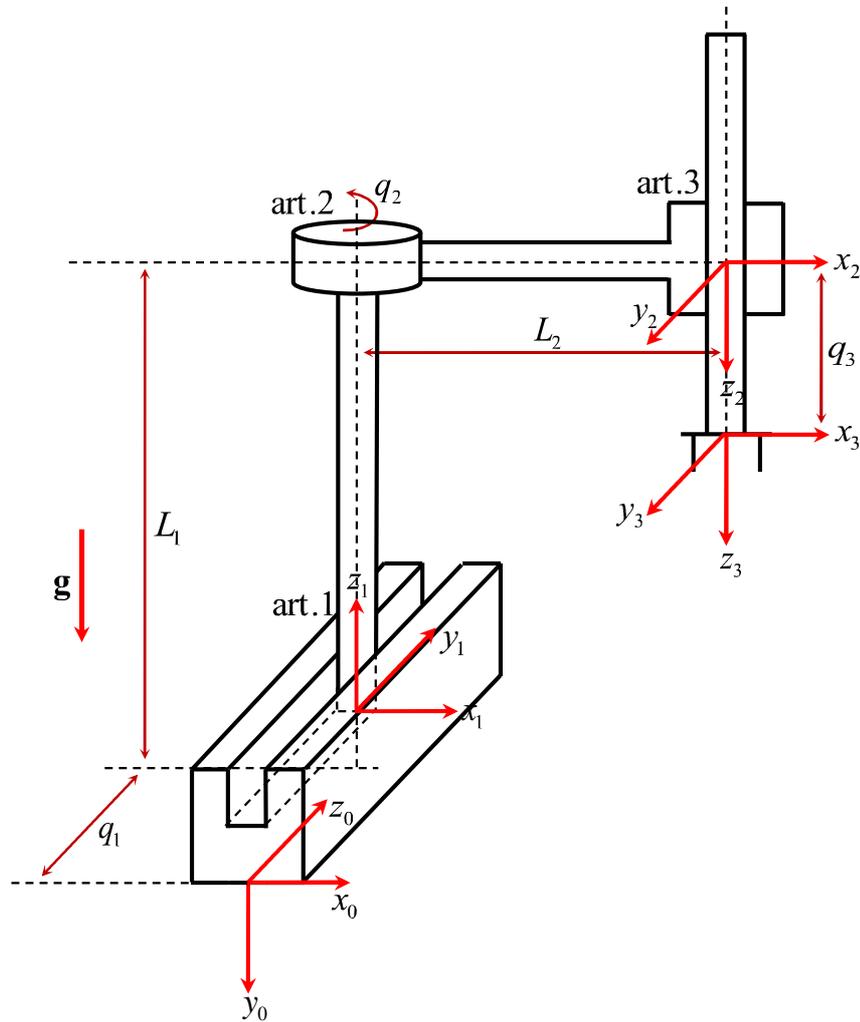


Figure 2.2 : Apposition des repères au robot dans sa configuration initiale.

2.4. Paramètres de Denavit-Hartenberg de la structure articulée:

La situation d'un repère R_i par rapport à un repère R_{i-1} peut être représentée par quatre paramètres géométrique dits de Denavit-Hartenberg (D-H).

Les axes de coordonnées sont apposés en respectant la règle suivante [10] [11]:

1. z_i est porté par l'axe de l'articulation reliant le segment i au segment $i+1$.
2. x_i est porté par la normale commune à z_{i-1} et z_i ($x_i = z_{i-1} \wedge z_i$).

Dans la littérature relative à la modélisation des structures articulaires, ces paramètres sont souvent notés : $\alpha, a, \theta,$ et d et sont définis comme suit [10] [11]:

1. α_i est l'angle orienté (z_{i-1}, z_i) autour de x_i (Link twist).
2. a_i est la mesure algébrique $\overline{z_{i-1}z_i}$ selon x_i (Link length).
3. θ_i est l'angle orienté (x_{i-1}, x_i) autour de z_{i-1} (Joint angle). (variable articulaire en cas d'une articulaires rotoïde).
4. d_i est la mesure algébrique $\overline{x_{i-1}x_i}$ selon z_{i-1} (Link offset). (variable articulaire en cas d'une articulation prismatique).

En considérant la position de l'origine du repère de base du robot et la position des origines des repères relatifs à chaque liaison à la **figure 2.2**, les paramètres D-H de toute la structure sont donnés au **Tableau 2.1** :

Liaison	α [°]	a [m]	θ [°]	d [m]
1 (prismatique)	90	0	0	q_1
2 (rotoïde)	180	L_2	q_2	L_1
3 (prismatique)	0	0	0	q_3

Tableau 2.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg du robot HC.

2.5. Matrices de transformation homogène entre repères :

La matrice de transformation homogène T_i^{i-1} qui représente la matrice de passage entre deux repères consécutifs R_{i-1} et R_i est définie d'après la convention de Spong par [10] :

$${}^{j-1}\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} C_\theta & -C_\alpha S_\theta & S_\alpha S_\theta & aC_\theta \\ S_\theta & C_\alpha \theta_\theta & -S_\alpha C_\theta & aS_\theta \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Avec : S_x et C_x désignent, respectivement, les fonctions circulaires sinus et cosinus dont l'argument est x .

L'application de (2.1) avec les valeurs des paramètres de Denavit-Hartenberg donnés au **tableau 2.1** permet d'avoir les matrices de transformation homogène entre repères successifs. Celles-ci sont données comme suit :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & L_2 C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & L_2 S_2 \\ 0 & 0 & -1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Ici, S_2 et C_2 veulent dire $\sin(q_2)$ et $\cos(q_2)$, respectivement.

Les matrices de transformation homogène correspondant aux repères de segments par rapport au repère de base sont telles que :

$${}^0T_2 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & L_2 C_2 \\ 0 & 0 & 1 & -L_1 \\ S_2 & -C_2 & 0 & L_2 S_2 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$${}^0T_E = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & L_2 C_2 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 - L_1 \\ S_2 & -C_2 & 0 & L_2 S_2 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.6. Modèles géométriques direct et inverse :

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de transformation 0T_E .

La position de l'outil est donnée par les trois premières valeurs de la quatrième colonne de 0T_E . Ce qui donne:

$$\begin{cases} x = L_2 C_2 \\ y = q_3 - L_1 \\ z = L_2 S_2 + q_1 \end{cases} \quad (2.5)$$

Ces trois valeurs correspondent aux coordonnées cartésiennes ou opérationnelles de la pointe de l'outil dans le repère de la base.

L'orientation de l'outil est donnée par la matrice de rotation correspondant aux trois premières lignes et premières trois colonnes de 0T_E . Ce qui donne :

$${}^0R_E = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ S_2 & -C_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Pour faire coïncider le repère de la base et celui de l'outil, ce dernier subit une rotation autour de l'axe X de 90° et Y et Z ne subissent aucune rotation. Autrement dit, les angles d'Euler correspondants sont tels que:

$$\begin{cases} \varphi = 90^\circ \\ \theta = 0^\circ \\ \psi = 0^\circ \end{cases} \quad (2.7)$$

Dans le cas du robot HC, la matrice de rotation est inutile car celui-ci ne possède que trois degrés de liberté et évolue dans un espace à six degrés de liberté. Autrement dit, le robot HC peut seulement positionner l'outil sans l'orienter. Cela s'adapte, bien-entendu, aux tâches industrielles les plus élémentaires comme le perçage, le fraisage...etc.

Le modèle géométrique inverse (MGI), qui est très utile en commande des robots, permet d'exprimer les coordonnées articulaires du robot en fonction des coordonnées opérationnelles de la pointe de l'outil. Il est déduit en inversant la relation (2.5) et est donné par :

$$\begin{cases} q_1 = z - \sqrt{L_2^2 - x^2} \\ q_2 = \arctan2(z - q_1, x) \\ q_3 = y + L_1 \end{cases} \quad (2.8)$$

Où : **arctan2** est la fonction donnant l'angle exact en spécifiant le quadrant.

2.7. Modèles cinématiques direct et inverse :

Le modèle cinématique direct (ou modèle des vitesses) d'un robot –manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires. Il s'obtient par la dérivation du modèle géométrique direct. Dans le présent travail, le modèle cinématique direct est donné comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = -\dot{q}_2 L_2 S_2 \\ \dot{y} = \dot{q}_3 \\ \dot{z} = \dot{q}_2 L_2 C_2 + \dot{q}_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Sous sa forme matricielle, (2.9) fait intervenir la matrice jacobienne paramétrée \mathbf{J} selon les variables opérationnelles utiles, comme suit :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (2.10)$$

Où :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & L_2 C_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$\dot{\mathbf{X}}$ et $\dot{\mathbf{q}}$ désignent respectivement, le vecteur des vitesses opérationnelles et celui des vitesses articulaires donnés par :

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

Le modèle cinématique inverse exprime la relation inverse. Dans le cas où la matrice jacobienne n'est pas singulière, il est donné comme suit :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{X}} \quad (2.11)$$

Il est à noter que le déterminant de \mathbf{J} est $\det(\mathbf{J}) = -L_2 S_2$. Cette matrice étant singulière à la position initiale ce qui doit être évité en choisissant une position initiale légèrement différente de $\mathbf{q}_2 = \mathbf{0}$.

La matrice jacobienne inverse est donnée par :

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{C_2}{S_2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{L_2 S_2} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

En ce qui concerne les accélérations opérationnelles en fonction des accélérations articulaires, on parlera de modèle cinématique du second ordre. Celui-ci est donné par dérivation de (2.11) :

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} \quad (2.12)$$

Inversement,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (2.13)$$

Où : \mathbf{J} est la matrice dérivée de la matrice jacobienne. Elle est donnée par :

$$\mathbf{j} = \begin{bmatrix} 0 & -L_2\dot{q}_2C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_2\dot{q}_2S_2 & 0 \end{bmatrix}$$

Les vecteurs $\ddot{\mathbf{X}}$ et $\ddot{\mathbf{q}}$ sont, respectivement, le vecteur des accélérations opérationnelles et celui des accélérations articulaires données par :

$$\ddot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}; \quad \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix}.$$

2.8. Modèle dynamique :

Le modèle dynamique est l'ensemble de relations qui régissent les mouvements des différentes articulations.

De façon rigoureuse, le modèle dynamique calcule les couples ou forces appliqué(e)s au robot en fonction des positions, vitesses et accélérations articulaires, et des efforts extérieurs d'interaction du robot avec l'environnement. On représente le modèle dynamique par une relation de la forme :

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (2.14)$$

Où :

- $\mathbf{\Gamma} = [f_1 \quad C_2 \quad f_3]^T$: Vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique ;
- $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$: est le vecteur des positions articulaires ;

- $\dot{\mathbf{q}}$: vecteur des vitesses articulaires ;
- $\ddot{\mathbf{q}}$: vecteurs des accélérations articulaires ;
- \mathbf{f} : est une fonction vectorielle multivariable fortement non linéaire ;

Pour un robot manipulateur à chaîne ouverte simple, le modèle dynamique peut se mettre sous la forme canonique suivante [12] :

$$\Gamma = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (2.15)$$

Où :

Γ : le vecteur des efforts.

\mathbf{M} : est la matrice d'inertie du robot, symétrique définie positive, qui dépend des variables articulaires. Elle englobe tous les termes d'inertie ou de masse des segments.

\mathbf{H} : est le vecteur des termes centrifuges, de Coriolis et gravitationnels. Il dépend de la position et de la vitesse articulaires.

Plusieurs formalismes ont été utilisés pour obtenir le modèle dynamique des robots. Les plus souvent utilisées sont :

- ❖ **Le formalisme de Newton-Euler** basé sur la théorie des torseurs cinématiques et dynamiques d'un solide en mouvement.
- ❖ **Le Formalisme d'Euler-Lagrange** basé sur les approches énergétiques et d'optimisation.

Dans ce travail, le formalisme d'Euler-Lagrange est adopté. Pour cela, il y a lieu d'abord d'exprimer les énergies potentielles et cinétiques du robot puis, de leurs appliquer le formalisme et mettre sous forme canonique.

2.8.1. Energie potentielle du robot [10]:

L'énergie potentielle U_i d'un segment i est donnée par :

$$U_i = -m_i \mathbf{g}^T \mathbf{P}_{ci} \quad (2.16)$$

Où :

\mathbf{P}_{ci} : le vecteur position du centre de masse du segment i exprimé dans le repère de la base.

\mathbf{g} : le vecteur de gravitation exprimé dans le repère de la base.

m_i : la masse du segment i ;

L'application de (2.16) au robot **HC** de la **figure 2.2** permet d'obtenir les énergies potentielles de chaque segment comme suit :

$$U_1 = -m_1 \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0}{2} \\ q_1 \end{bmatrix}, \text{ ce que donne :}$$

$$U_1 = 0 \tag{2.17}$$

$$U_2 = -m_2 \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 C_2 \\ \frac{-L_1}{2} \\ L_2 S_2 + q_1 \end{bmatrix}, \text{ ce que donne :}$$

$$U_2 = m_2 g \frac{L_1}{2} \tag{2.18}$$

$$U_3 = -m_3 \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{g} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 C_2 \\ \frac{q_3 - L_1}{2} \\ L_2 S_2 + q_1 \end{bmatrix}, \text{ ce que donne :}$$

$$U_3 = m_3 g \frac{L_1 - q_3}{2} \tag{2.19}$$

L'énergie potentielle totale du robot est donnée par :

$$U = \sum_{i=1}^4 U_i = \frac{m_2 + m_3}{2} g L_1 - m_3 \frac{g}{2} q_3 \tag{2.20}$$

2.8.2. Energie cinétique du robot [10] [11]:

L'énergie cinétique K_i du segment i est donnée par :

$$\mathbf{K}_i = \frac{1}{2} \mathbf{m}_i \mathbf{V}_i^2 + \frac{1}{2} \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i^2 \tag{2.21}$$

Où :

V_i : le vecteur **vitesse de translation** du centre de masse du segment i dans le repère de la base.

ω_i : le vecteur **vitesse de rotation** du segment i autour de son centre de masse dans le repère de la base.

I_i : le **moment d'inertie** du segment i autour de l'axe passant par son centre de masse.

Par ailleurs, les vecteurs V_i et ω_i s'expriment en fonction des vitesses articulaires \dot{q} et des **jacobiennes de base** par :

$$V_i = J_{iV}(q)\dot{q} \tag{2.22a}$$

$$\omega_i = J_{i\omega}(q)\dot{q} \tag{2.22b}$$

Où : J_{iV} est la **sous-jacobienne linéaire** constituée des trois premières lignes de la jacobienne relative au segment i .

$J_{i\omega}$ est la **sous-jacobienne angulaire** constituée des trois dernières lignes de la jacobienne relative au segment i .

Les jacobiennes de base relatives à chaque segment J_i sont obtenues par l'algorithme des torseurs cinématiques. Elles sont données par la concaténation de i colonnes: J_{ik} , $k=1\dots i$ comme suit [12]:

$$J_{ik} = \begin{bmatrix} a_{k-1}^0 \wedge (P_i^0 - P_{k-1}^0) \\ a_{k-1}^0 \end{bmatrix} \quad \text{si l'articulation } k \text{ est } \mathbf{rotoïde} \tag{2.23.a}$$

$$J_{ik} = \begin{bmatrix} a_{k-1}^0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{si l'articulation } k \text{ est } \mathbf{prismatique} \tag{2.23.b}$$

Avec : a_i^0 est le vecteur constitué des trois premiers éléments de la troisième colonne de la matrice T_i^0 . Par convention $a_0^0 = (0 \ 0 \ 1)^T$.

L'application de (2.22),..., (2.23) au robot **HC** conduit à :

Segment 1 (i=1, k=1):

$$J_1 = J_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{q}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}; \omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{q}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix};$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 = \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2; \quad (2.24)$$

Segment 2 (i=2, k=1, 2):

$$J_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; J_{22} = \begin{bmatrix} -L_2 S_2 \\ 0 \\ L_2 C_2 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}; J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 \\ 0 & 0 \\ 1 & L_2 C_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 \\ 0 & 0 \\ 1 & L_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q}_2 L_2 S_2 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 L_2 C_2 \end{bmatrix}; \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 V_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 L_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 L_2 C_2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2; \quad (2.25)$$

Segment 3 (i=3, k=1, 2, 3) :

$$J_{31} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; J_{32} = \begin{bmatrix} -L_2 S_2 \\ 0 \\ L_2 C_2 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}; J_{33} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; J_3 = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & L_2 C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$V_3 = \begin{bmatrix} 0 & -L_2 S_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & L_2 C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q}_2 L_2 S_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 L_2 C_2 \end{bmatrix}; \omega_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 V_3^2 + \frac{1}{2} I_3 \omega_3^2 = \frac{1}{2} m_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 L_2^2 + \dot{q}_3^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 L_2 C_2) + \frac{1}{2} I_3 \dot{q}_2^2; \quad (2.26)$$

L'énergie cinétique totale du robot **HC** est donnée par :

$$K = K_1 + K_2 + K_3$$

$$K = \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}(I_2 + I_3 + (m_2 + m_3)L_2^2)\dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{q}_3^2 + (m_2 + m_3)L_2C_2\dot{q}_1\dot{q}_2 \quad (2.27)$$

2.8.3. Formalisme d’Euler Lagrange :

Le Formalisme d’Euler Lagrange permet d’obtenir directement les relations entre les efforts moteurs, aux articulations, et les équations du mouvement en termes de variables articulaires. Pour chaque articulation, l’équation du mouvement est obtenue comme suit :

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_i} ; i = 1, \dots, n \quad (2.28)$$

Avec : $W=K - U$ est le Lagrangien du système.

n est Nombre de degrés de liberté du robot

En appliquant l’équation (2.28) à chaque articulation, on obtient :

1^{ère} articulation :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_1} = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{q}_1 + (m_2 + m_3)L_2(\ddot{q}_2C_2 - \dot{q}_2^2S_2) \quad (2.29)$$

2^{ème} articulation :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_2} = (I_2 + I_3 + (m_2 + m_3)L_2^2)\ddot{q}_2 + (m_2 + m_3)L_2(\ddot{q}_1C_2 - \dot{q}_1\dot{q}_2S_2) \quad (2.30)$$

3^{ème} articulation :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{q}_3} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_3} = m_3\ddot{q}_3 + \frac{1}{2} m_3g \quad (2.31)$$

Les équations (2.29), (2.30) et (2.31) ensemble, peuvent se mettre sous la forme (2.14).

La matrice d'inertie $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ et le vecteur $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ sont ainsi identifiés :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & (m_2 + m_3)L_2C_2 & \mathbf{0} \\ (m_2 + m_3)L_2C_2 & I_2 + I_3 + (m_2 + m_3)L_2^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & m_3 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -(m_2 + m_3)L_2\dot{q}_2^2 S_2 \\ -(m_2 + m_3)L_2\dot{q}_1\dot{q}_2 S_2 \\ \frac{1}{2} m_3 g \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

L'effort de maintien (holding torque) est donné, en annulant toutes les vitesses et accélérations, par l'expression :

$$\Gamma_h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} m_3 g \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la structure du robot manipulateur **HC**, apposée les repères et calculé les matrices de transformations homogènes associées aux différents repères.

Pour exposer les relations mathématiques de base qui lient les deux espaces de coordonnées relatifs à la robotique, à savoir l'espace articulaire et l'espace opérationnel, nous avons développé les modèles directs puis inverses.

Le modèle dynamique permet d'exprimer les efforts à développer par les actionneurs équipant les articulations du robot en fonction des positions et vitesses articulaires. Ces efforts permettent de modifier la configuration du robot afin d'atteindre une morphologie désirée et avec des performances dictées par le cahier des charges

En exploitants tour à tour la théorie des torseurs cinématiques et le formalisme énergétique d'Euler-Lagrange, nous avons détaillé le modèle dynamique du robot **HC** et l'avons mis sous forme canonique.

3.1. Introduction :

Les robots sont largement utilisés en industrie automobile, fabrication de circuits intégrés, milieux hostiles, voire même en médecine pour déplacer, trancher, ébavurer, façonner...etc. Ils sont donc dotés de capacités de perception de leur environnement tout en évitant les obstacles. En industrie, le plus souvent ces tâches sont répétitives et exigent une trajectoire bien définie en termes de cinématique que l'outil du robot devra suivre. La planification de telles trajectoires dans l'espace de travail est une tâche nécessaire à l'accomplissement de la présente étude.

3.2. Définition de la trajectoire :

La génération de la trajectoire consiste à calculer pour chaque articulation la position, la vitesse et l'accélération de référence qui assurent le passage de l'outil par l'ensemble des points constituant la trajectoire désirée (planifiée).

L'évolution de la position, la vitesse et l'accélération s'expriment en fonction du temps et constituent les consignes pour le dispositif de commande du robot.

3.3. Génération de la trajectoire désirée :

Dans cette section on s'intéresse à la génération de la trajectoire que doit parcourir l'outil du robot en suivant un segment [AB] en allant d'un point A vers un autre point B. De plus, l'outil doit démarrer et arriver à vitesse nulle.

Géométriquement, un segment est une portion de droite délimitée par deux points, appelés extrémités, voir **figure 3.1**.

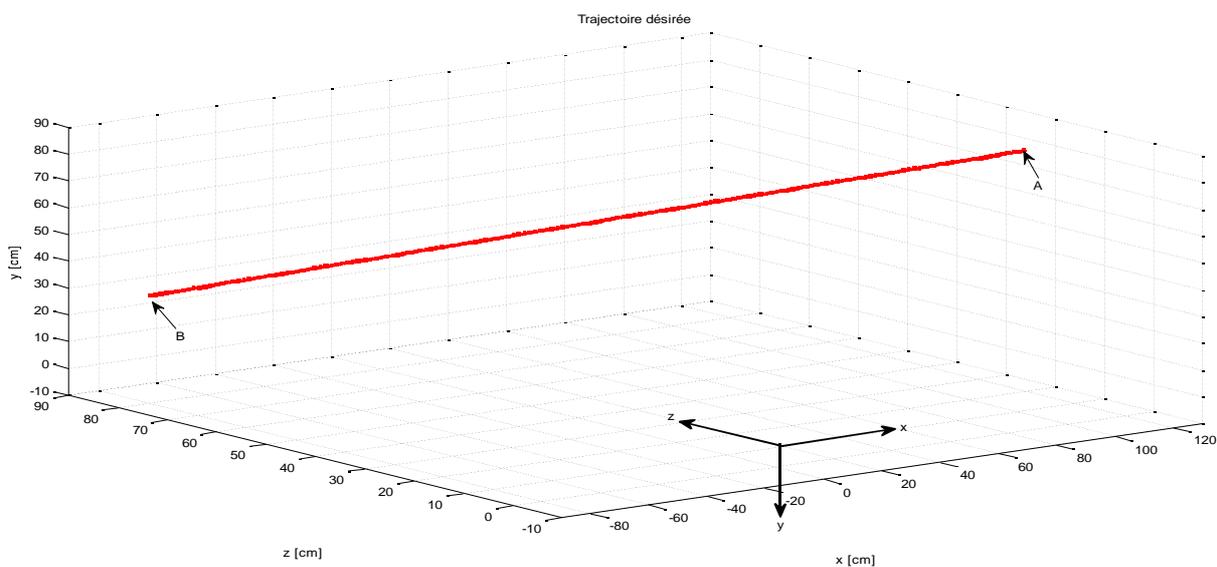


Figure 3.1 : Trajectoire désirée.

Les paramètres du segment sont sélectionnés tels que :

A($x_0; y_0; z_0$) : le point de départ.

B ($x_f; y_f; z_f$) : le point d'arrivée.

L'équation paramétrique du segment s'écrit en fonction de trois constantes représentant les trois cosinus directeurs, suivant les trois axes du repère de la base, du vecteur directeur. Celles-ci sont données, respectivement, ($x_f - x_0$) pour l'axe des abscisses, ($y_f - y_0$) pour l'axe des ordonnées et ($z_f - z_0$) pour l'axe des ordonnées.

L'équation paramétrique du segment s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_f - x_0)\theta + x_0 \\ (y_f - y_0)\theta + y_0 \\ (z_f - z_0)\theta + z_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Où : le paramètre de balayage θ évolue en fonction du temps dans l'intervalle $[0;1]$, selon une loi horaire de type Bang-Bang avec palier de vitesse.

3.4. Evolution du paramètre θ par la loi horaire de type Bang-Bang avec palier de vitesse :

La loi Bang-Bang avec palier de vitesse, appelée aussi loi trapèze, est la loi horaire optimale, parmi celles qui assurent la continuité de la vitesse et de la position, cependant l'accélération reste discontinue. Cette loi convient bien à notre cahier des charges, en effet, le mobile démarre à vitesse nulle ($\dot{\theta}(0) = 0$), accélère jusqu'à atteindre une vitesse maximum $\dot{\theta}_{\max}$ à l'instant t_a qu'il maintient jusqu'à l'instant $t_f - t_a$ puis décélère pour retrouver la vitesse nulle à l'instant final t_f ($\dot{\theta}(t_f) = 0$) (voir la **figure 3.2**).

D'après la loi Bang-bang, la vitesse de balayage $\dot{\theta}(t)$ est donnée par :

$$\dot{\theta}(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a} t, 0 \leq t \leq t_a \\ \dot{\theta}_{\max}, t_a \leq t \leq t_f - t_a \\ \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a} (t_f - t), t_f - t_a \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3.2)$$

L'accélération $\ddot{\theta}(t)$ est déduite en dérivant (3.2) par rapport au temps, elle est donnée par :

$$\ddot{\theta}(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a}, 0 \leq t \leq t_a \\ 0, t_a \leq t \leq t_f - t_a \\ -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a}, t_f - t_a \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3.3)$$

La position $\theta(t)$ est obtenue en intégrant les équations de vitesse dans l'intervalle de temps correspondant à chaque étape du mouvement.

Pour $t \in [0, t_a[$:

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow d\theta = \dot{\theta} dt \quad (3.4)$$

En intégrant les deux membres de (3.4)

$$\int_{\theta}^{\theta(t)} d\theta = \int_0^t \dot{\theta} dt \quad (3.5)$$

Ce qui donne :

$$\theta(t) = \int_0^t \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a} t dt = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_a} t^2 \quad (3.6)$$

Ainsi la position à l'instant t_a est donnée par :

$$\theta(t_a) = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{2} t_a \quad (3.7)$$

Pour $t \in [t_a, t_f - t_a[$:

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}_{\max} \Rightarrow \int_{\theta(t_a)}^{\theta(t)} d\theta = \int_{t_a}^t \dot{\theta}_{\max} dt \quad (3.8)$$

Ce qui donne :

$$\theta(t) = \dot{\theta}_{\max} \left(t - \frac{t_a}{2} \right) \quad (3.9)$$

Ainsi la position à l' instant $t_f - t_a$ est donnée par :

$$\dot{\theta}(t_f - t_a) = \dot{\theta}_{\max} \left(t_f - \frac{3t_a}{2} \right) \quad (3.10)$$

Pour $t \in [t_f - t_a, t_f[$:

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a}(t_f - t) \quad (3.11)$$

En intégrant les deux nombres on aura :

$$\int_{\theta(t_f - t_a)}^{\theta(t)} d\theta = \int_{t_f - t_a}^{t_f} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_a}(t_f - t_a) dt \quad (3.12)$$

Ce qui donne :

$$\theta(t) = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_a}(t^2 + t_f^2 - t_a^2 - 2t_f t) + \dot{\theta}_{\max} \left(t_f - 3\frac{t_a}{2} \right) \quad (3.13)$$

A l'instant t_f , la position est donnée par :

$$\theta(t) = -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_a}t_a^2 + \dot{\theta}_{\max} \left(-3\frac{t_a}{2} \right) \quad (3.14)$$

Ou encore :

$$\theta(t_f) = \dot{\theta}_{\max}(t_f - t_a) \quad (3.15)$$

Or d'après le cahier des charges $\theta(t_f) = 1$ donc la valeur de $\dot{\theta}_{\max}$ est imposée telle que :

$$\dot{\theta}_{\max} = \frac{1}{t_f - t_a} \quad (3.16)$$

Finalement, la position $\theta(t)$ est donnée par :

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_a}t^2, 0 \leq t \leq t_a \\ \dot{\theta}_{\max} \left(t - \frac{t_a}{2} \right), t_a \leq t \leq t_f - t_a \\ \frac{-\dot{\theta}_{\max}}{2t_a}(t^2 + t_f^2 - t_a^2 - 2t_f t), t_f - t_a \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3.17)$$

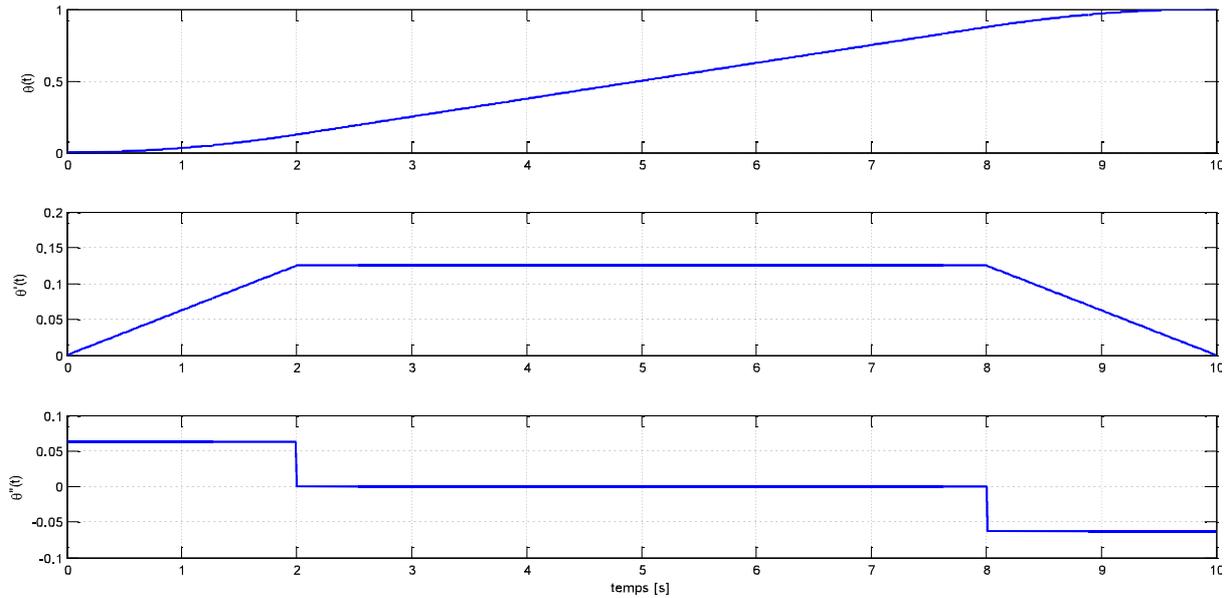


Figure 3.2 : Loi horaire de type Bang-Bang avec palier de vitesse du paramètre de balayage.

3.5. Génération de la trajectoire :

Les générateurs de trajectoires ont pour but de déterminer l'évolution des positions des articulations ou de la situation du robot en fonction du temps. Cette trajectoire de référence, une fois transformée dans l'espace articulaire du robot, définira l'entrée du système de commande. Le générateur présente une grande importance car la qualité du mouvement produit dépend étroitement de la continuité de la trajectoire générée ainsi que ses dérivées. Cette qualité impacte non seulement la précision de suivi du chemin mais aussi la durée de vie du système mécanique.

En exploitant (1), les expressions des coordonnées cartésiennes désirées de la pointe de l'outil x_d, y_d, z_d sont donnée par :

$$\begin{cases} x_d = (x_f - x_0)\theta + x_0 \\ y_d = (y_f - y_0)\theta + y_0 \\ z_d = (z_f - z_0)\theta + z_0 \end{cases} \quad (3.21)$$

En notant par \mathbf{X}_{ref} le vecteur position désirée: $[x_d \quad y_d \quad z_d]^T$, on peut écrire :

$$\mathbf{X}_{ref} = \begin{bmatrix} (x_f - x_0)\theta + x_0 \\ (y_f - y_0)\theta + y_0 \\ (z_f - z_0)\theta + z_0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Une simple dérivation de \mathbf{X}_{ref} conduit à :

$$\dot{\mathbf{X}}_{ref} = \begin{bmatrix} (x_f - x_0)\dot{\theta} \\ (y_f - y_0)\dot{\theta} \\ (z_f - z_0)\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

de même :

$$\ddot{\mathbf{X}}_{ref} = \begin{bmatrix} (x_f - x_0)\ddot{\theta} \\ (y_f - y_0)\ddot{\theta} \\ (z_f - z_0)\ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.6. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la description de la tâche à réaliser par le robot. Cette description se traduit par une trajectoire à suivre par l'outil du robot. Pour la générer, une loi horaire bien adaptée (loi bang-Bang avec palier de vitesse) a été utilisée et à partir de laquelle ont été déduites toutes les grandeurs opérationnelles de références à savoir la position, la vitesse et l'accélération.

4.1. Introduction :

La commande d'un robot manipulateur a pour objet de déterminer le vecteur des forces généralisées (forces ou couples) que les actionneurs doivent développer afin de garantir l'exécution de la tâche tout en satisfaisant certains critères de performance. Différentes techniques ont été utilisées pour la commande des bras manipulateurs, en se basant sur l'équation dynamique du robot, pour cela les contraintes dynamiques du robot doivent être prises en compte et les paramètres qui les caractérisent sont bien identifiés.

4.2. Cahier des charges :

Après avoir planifié la tâche à réaliser par le robot (segment de droite) et calculé la position, vitesse et accélération de références (chapitre précédent), il reste à calculer une commande pour piloter les actionneurs des différentes articulations du robot afin d'assurer la poursuite de la trajectoire désirée dont dépend uniquement la qualité du produit.

4.3. Techniques de commande classiques :

Différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. Pour cela, une panoplie de techniques rapportées dans la littérature sera citée ci-dessous.

4.3.1. Commande adaptative :

Ce type de techniques vise à corriger les déficiences de la commande par découplage non linéaire, comme la connaissance approximative des paramètres du modèle du robot ou pour s'adapter aux différentes conditions opératoires. Les avantages de ce type de techniques sont évidents, cependant la puissance de calcul demandée au système constitue un inconvénient important [13] [14].

4.3.2. Commande fondée sur une fonction de Lyapunov :

Cette méthode est basée sur une fonction de Lyapunov qui a été utilisée pour la commande des bras manipulateurs de façon satisfaisante pour des tâches de suivi. Particulièrement lorsqu'on cherche à garantir la convergence asymptotique [13] [14].

4.3.3. Commande passive :

Cette technique considère le robot comme un système passif, c'est à dire un système qui dissipe de l'énergie. De telles lois de commande permettent de modifier l'énergie naturelle du robot pour qu'il réalise la tâche. En utilisant le formalisme de Hamilton, la commande cherche à minimiser l'énergie du système en utilisant un bloc non linéaire passif dans la boucle de retour. La commande passive tend à être plus robuste que le découplage non linéaire, lorsque la technique ne recherche pas à annuler les non linéarités [13] [14].

4.3.4. Commande prédictive :

C'est une technique de commande de l'automatique avancée. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé [13] [14].

4.4. Commande par couple calculé (*computed torque*) :

Cette technique est aussi connue sous le vocable de commande dynamique ou commande par découplage non linéaire. Lorsque l'application exige des évolutions rapides avec des contraintes dynamiques, la commande doit prendre en compte les forces d'interaction. Ce type de commande considère l'ensemble des articulations et, pour les découpler, utilise la théorie du découplage non linéaire. Cette théorie utilise le modèle dynamique du robot pour le calcul de la loi de commande, ce qui conduit à des lois de commande centralisées non linéaires. La commande par couple calculé permet de synthétiser facilement des régulateurs de robots très efficaces, tout en fournissant un cadre pour rassembler les techniques de commande classiques et quelques techniques de commande modernes.

4.5. Synthèse de la loi de commande par couple calculé :

L'équation dynamique dans l'espace articulaire étant la suivante :

$$\Gamma = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \tag{4.1}$$

L'équation dynamique de l'erreur $\mathbf{e} = \mathbf{q}_{ref} - \mathbf{q}$ est choisie de telle manière à ce que la solution de cette dernière soit exponentiellement stable (cahier des charges). Pour atteindre cet objectif, un choix possible est donné par l'équation d'erreur ci-dessous :

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = \mathbf{0} \tag{4.2}$$

Où $\mathbf{k}_p, \mathbf{k}_v$ sont des matrices diagonales définies positives représentant respectivement les gains proportionnels et dérivés.

Autrement dit :

$$(\ddot{\mathbf{q}}_{ref} - \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{k}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = \mathbf{0} \tag{4.3}$$

Ou encore,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{k}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} \tag{4.4}$$

L'équation (4.1) conduit à l'expression de l'accélération suivante :

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{\Gamma} - \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \quad (4.5)$$

Par identification de (4.4) et (4.5), on peut écrire :

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{k}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{\Gamma} - \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \quad (4.6)$$

Finalement, l'expression de la commande est donnée par :

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{k}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_p \mathbf{e}) + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.7)$$

La loi de commande donnée par (4.7) est représentée à la **Figure 4.1**.

Il faut noter que cette loi de commande, qui utilise la technique de linéarisation, exige la connaissance parfaite du modèle dynamique notamment, la matrice \mathbf{M} et le vecteur \mathbf{H} . Cela représente un inconvénient majeur du point de vue robustesse de la commande aux incertitudes de modélisation qui sont, dans la plus part des cas, inévitables [10].

Une des solutions au problème de robustesse de la commande par couple calculé est l'introduction d'un terme d'estimation non adaptatif dans la loi de commande [15] [16].

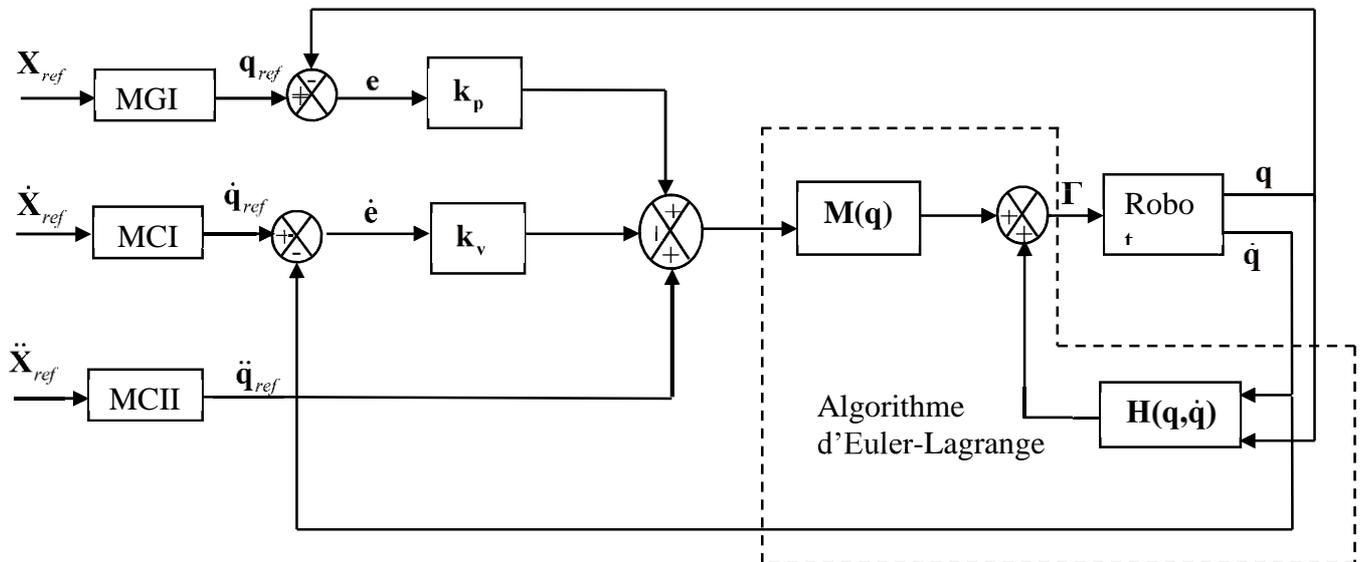


Figure 4.1. Schéma de commande par couple calculé dans l'espace articulaire.

Simulation et discussion :

Nous avons élaboré un programme MATLAB implémentant la méthode d'Euler pour la résolution de l'équation dynamique et ce pour simuler le fonctionnement du robot commandé par le couple calculé.

Les paramètres de simulation qui ont donné satisfaction sont choisis tels que :

➤ **Gains du régulateur :**

On impose à l'équation d'erreur désirée (4.2) un temps de réponse $t_r = 0.3s$ (la pulsation naturelle est $\omega_n = 10rad/s$) et un amortissement $\xi = 0.7$ ce qui donne :

$$\mathbf{K}_p = 100 \times \text{blockdiag}([1 \ 1 \ 1]); \mathbf{k}_v = 14 \times \text{blockdiag}([1 \ 1 \ 1])$$

➤ **Paramètres du robot :**

Masse en Kg : $m_1 = 5.0, m_2 = 2.0, m_3 = 1.0$

Longueurs en m : $L_1 = 1.00, L_2 = 1.80$

Moment d'inertie en $K.m^2$: $I_2 = 0.3, I_3 = 0.5$

Deux situations de fonctionnement du robot sont considérées à savoir :

Situation normale : aucune incertitude de modélisation n'est considérée.

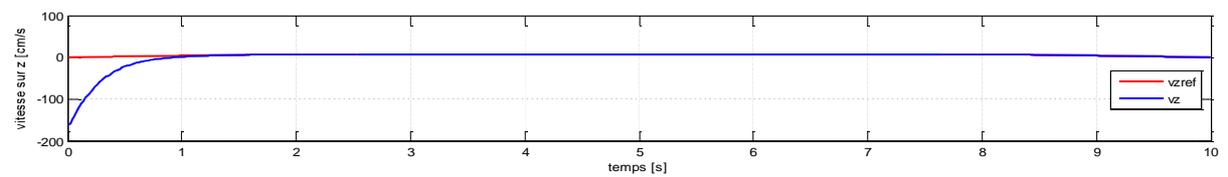
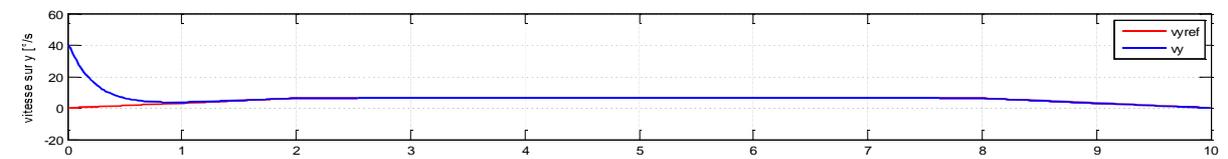
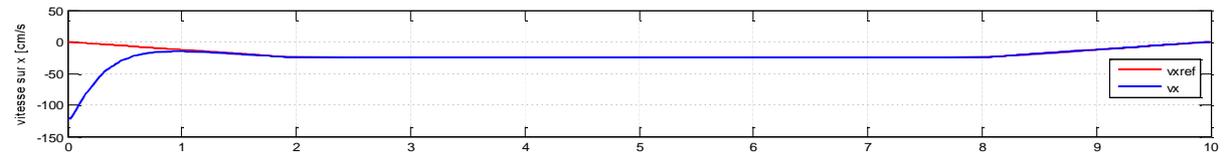
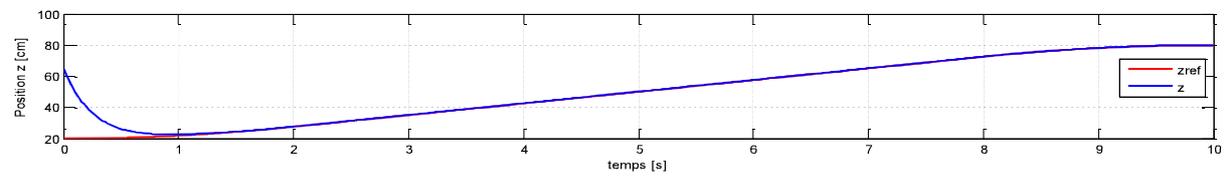
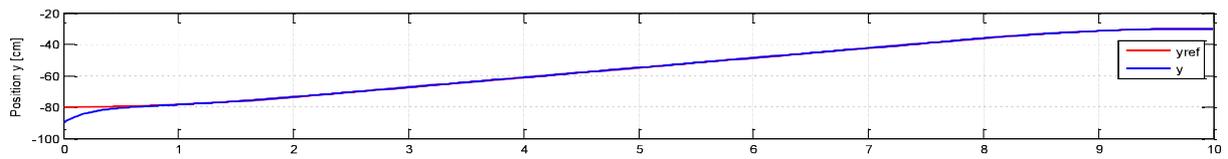
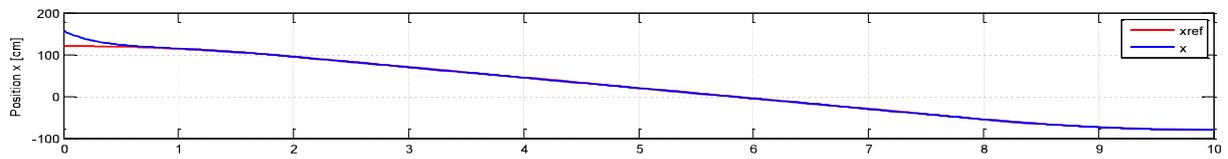
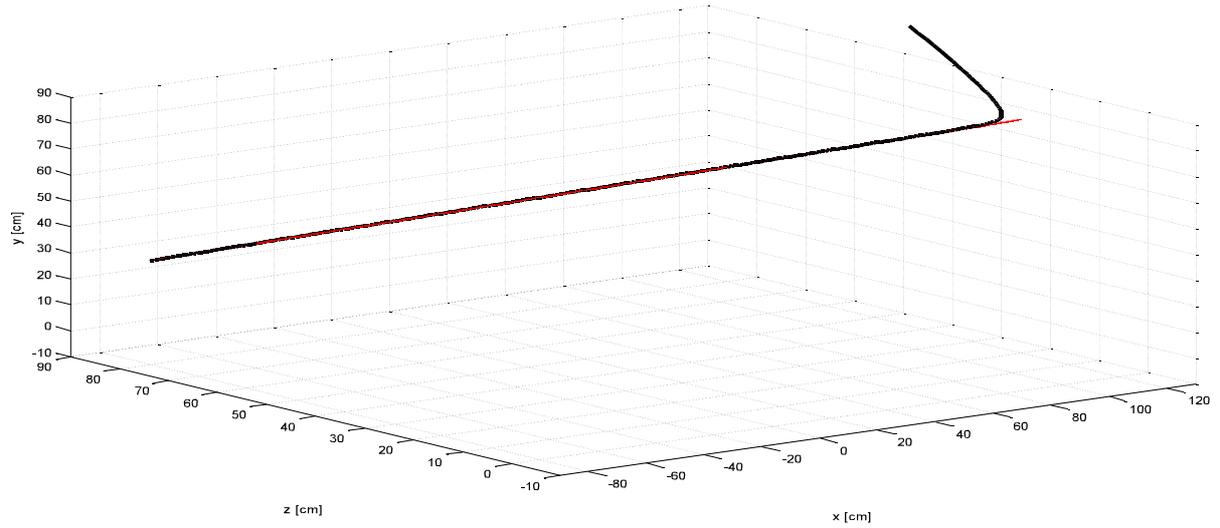
Situation de défaillance : des incertitudes de modélisation de 10% sur la matrice d'inertie $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ et de 70% sur le vecteur $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ sont considérées.

Pour chaque situation, un indice de performance est calculé comme suit :

$$s = \int_0^{+\infty} \|\mathbf{e}(\tau)\| d\tau \tag{4.8}$$

Cet indice permet de quantifier la norme de l'erreur en position de l'outil. Par conséquent, il mesure la performance de précision du système de commande.

Les résultats de simulation sont donnés aux **Figures 4.2** et **4.3** :



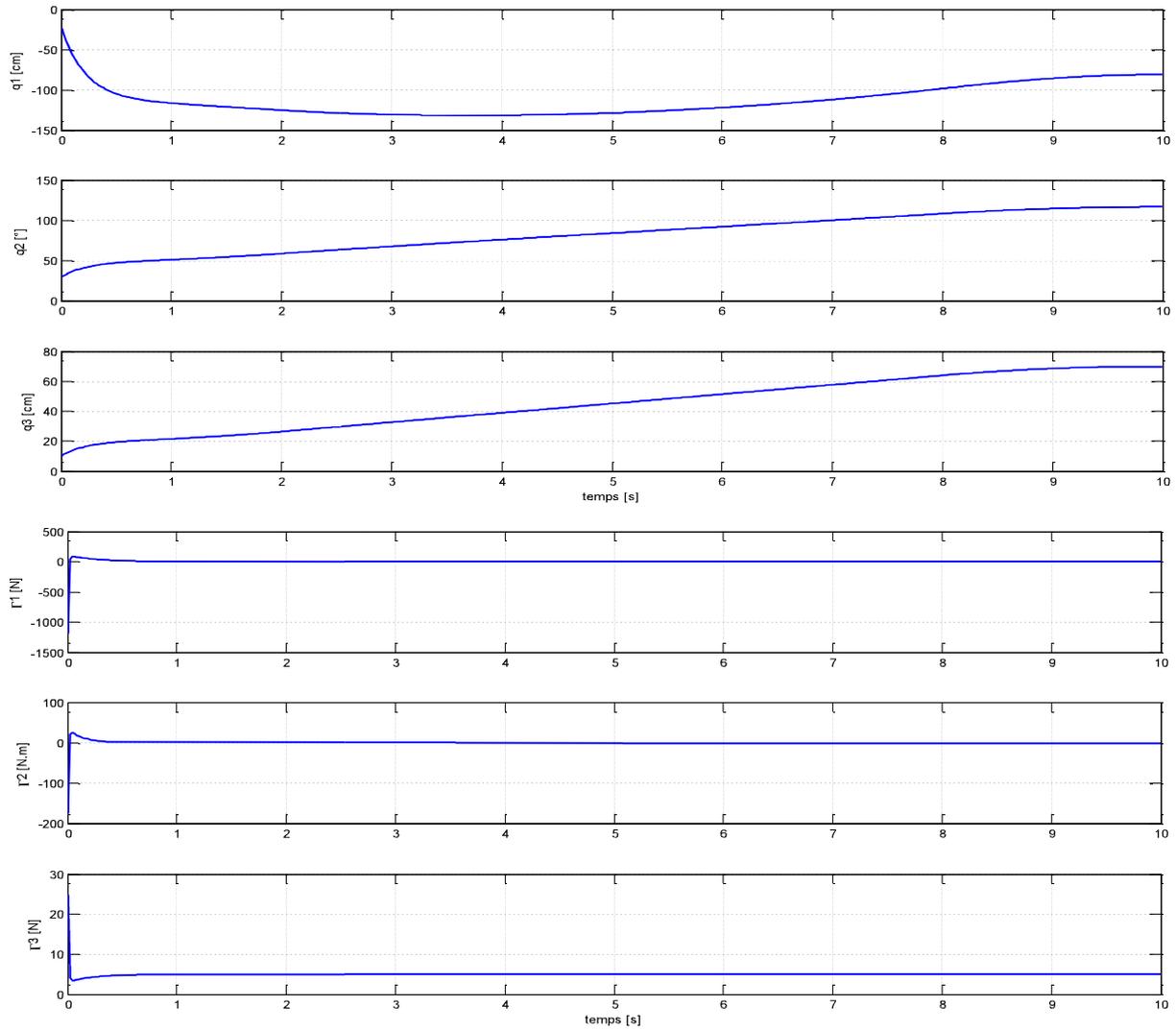
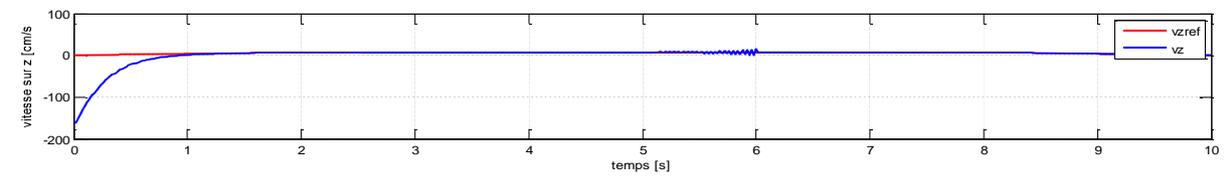
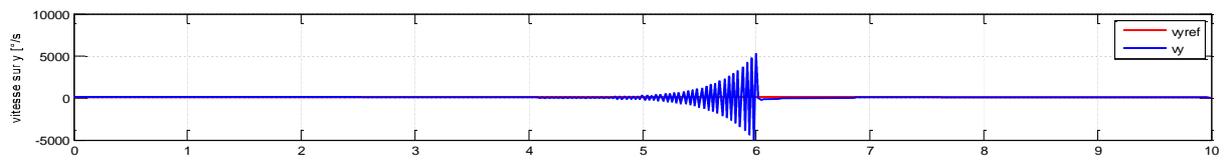
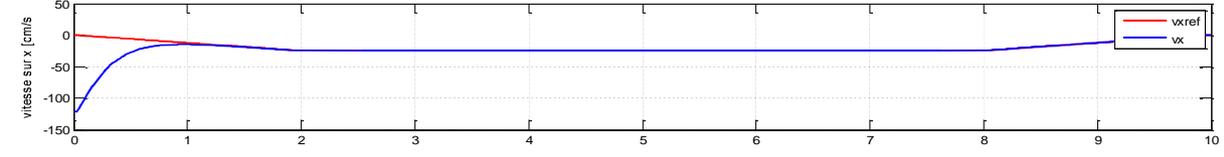
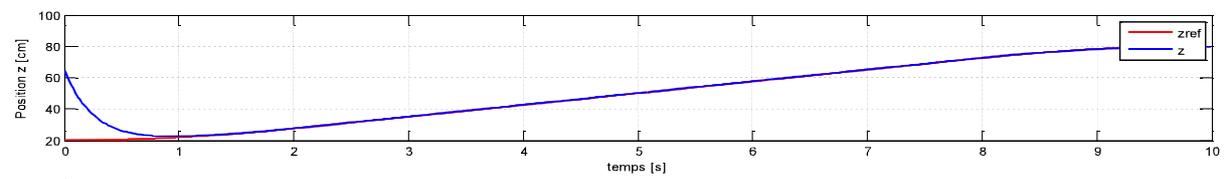
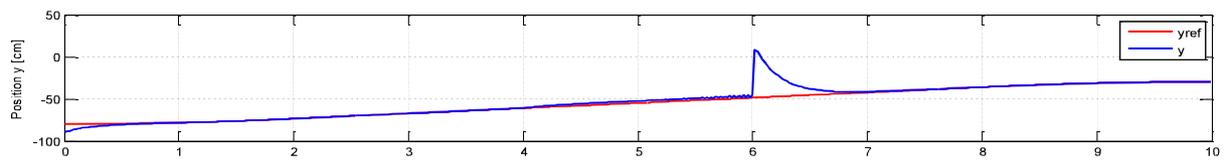
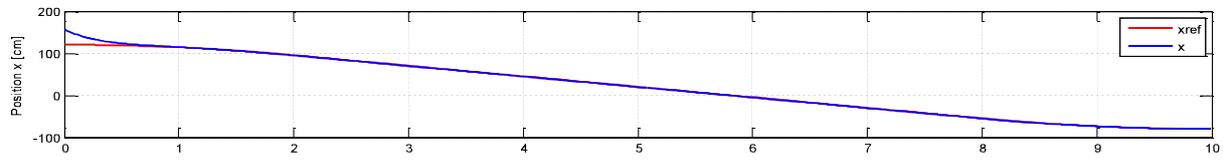
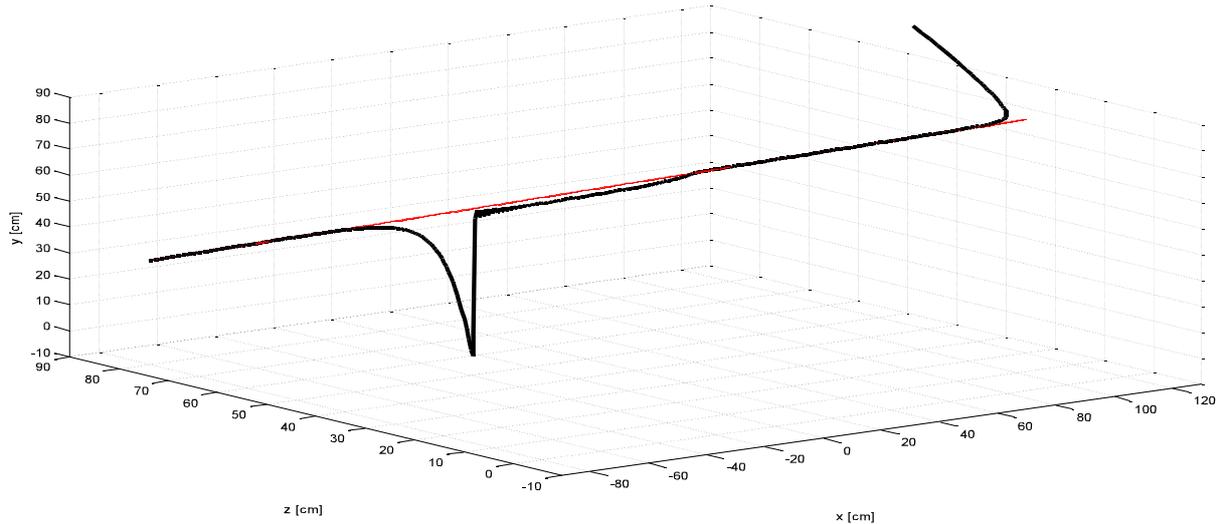


Figure 4.2 : Réponse du système en situation normale ($s= 19.05\%$).



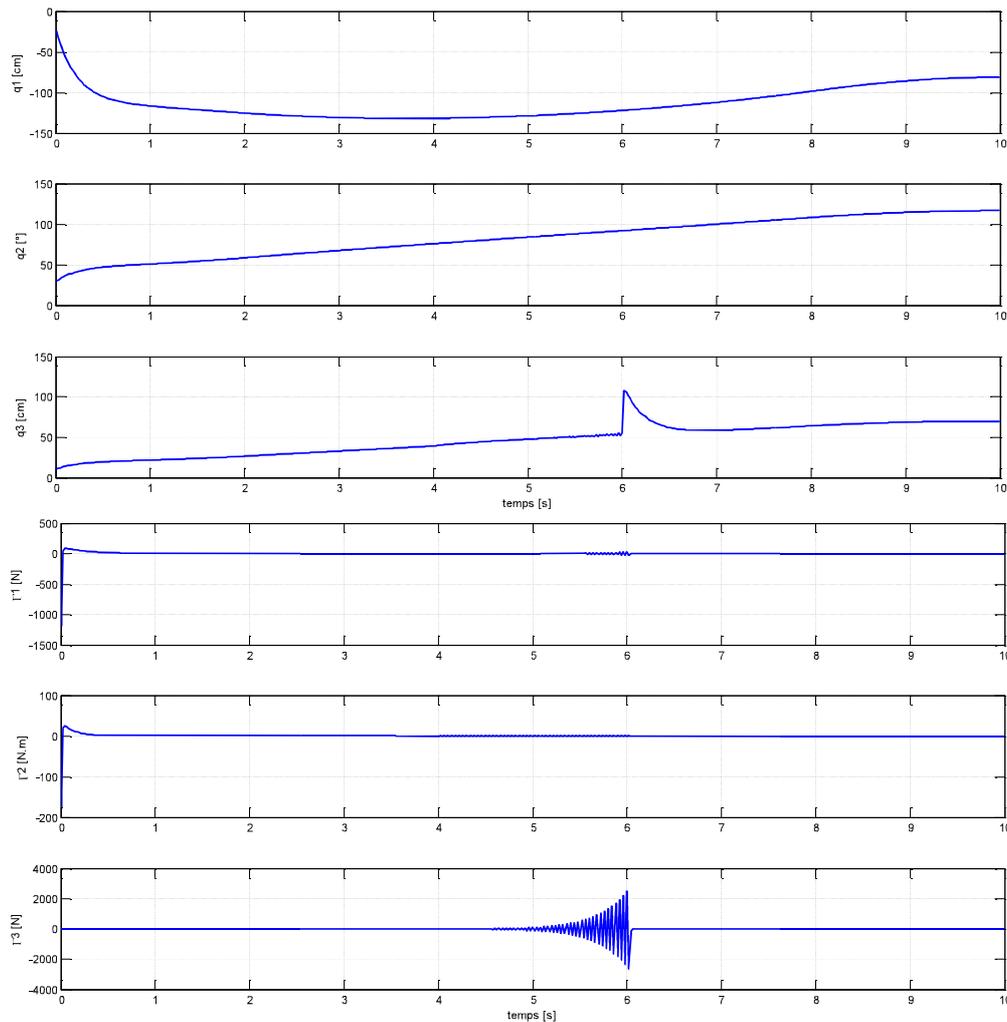


Figure 4.3: Réponse du système en situation de défaillance ($s=54.45\%$).

D'après les résultats de simulation donnés aux figures (4.2) et (4.3), il est clair que la propriété d'atteignabilité est satisfaite avec une continuité des mouvements opérationnels et articulaires.

L'analyse des courbes relatives aux efforts développés montre qu'ils sont admissibles et loin des limites des actionneurs. La commande par couple calculé (linéarisante) s'avère donc très performante et donne de bons résultats dans le cas où le modèle est certain. Néanmoins, dans la situation de défaillance les performances du système de commande sont très dégradées et la poursuite du parcours désiré est perdue.

4.6. Commande par couple calculé flou (*Fuzzy Computed Torque Control*):

Les algorithmes de commande les plus simples et les plus utilisés sont basés sur la théorie classique de commande. Dans beaucoup d'applications, cependant, la dynamique du système peut être non linéaire, temps-variante voire même inconnue. Les dynamiques des robots sont inévitablement non linéaires et peuvent ne pas être bien connues. Beaucoup de systèmes sont astreints à fonctionner dans une petite plage de leur véritable domaine de fonctionnement comme les servomoteurs qui doivent fonctionner dans la partie

linéaire du domaine de fonctionnement pour une commande précise. Souvent pour assurer des performances satisfaisantes, les restrictions sur le fonctionnement des systèmes limitent leur utilité.

Afin de contrecarrer les effets des incertitudes et des perturbations, il faut faire recours aux techniques de commande dites robustes.

La commande par couple calculé flou est une commande robuste active, l'adaptation des gains de commande permet d'anticiper sur les effets des erreurs de modélisations et éventuellement les signaux perturbateurs et non connues à priori.

L'idée de base est de se servir d'un système flou pour ajuster les gains de commande dans le but d'adapter les gains de commande à la situation dans laquelle fonctionne le robot.

A l'inverse de la commande adaptative indirecte qui utilise les informations actuelles pour prédire les perturbations, le principe de la commande par couple calculé flou repose sur l'adaptation des gains de commande pour minimiser l'erreur de poursuite.

4.6.1. Logique floue :

La logique floue s'inspire du mode de raisonnement de l'être humain qui évalue certaines grandeurs de façon imprécise ou vague.

Un système flou est un système à base de connaissances particulières utilisant un raisonnement linguistique dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses). On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du système flou. Les variables caractéristiques sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus.

La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles.

La base de données regroupe :

- les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du système flou,
- les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

La base de règle contient des règles de la forme :

«Si X_1 est A_1 et X_2 est A_2 ...et X_n est A_n Alors Y est B »

Où : X_1, X_2, \dots, X_n et Y sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande A_1, A_2, \dots, A_n et B sont des labels linguistiques.

Suivant la nature de B on parlera de :

- Règles à conclusion symbolique (système de type Mamdani) : B est une valeur linguistique.

Exemple :

Si l'erreur est «Négatif Moyen» et la variation de l'erreur est «Positif Petit» Alors la sortie est «Négatif Petit».

Lorsque B est une valeur numérique, on parle de règles de Takagi-Sugeno «d'ordre zéro», sinon, de règles à conclusion polynomiale.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un système flou : la fuzzification, le mécanisme de décision et la défuzzification.

- La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.
- Le mécanisme de décision permet de calculer les ensembles flous associés à la commande.
- La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de sortie.

Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont des étapes optionnelles.

4.6.2. Mise en forme des entrées ou normalisation :

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du système flou, par exemple, calcul de l'erreur et des variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés (univers de discours normalisé comprise entre -1 et 1) nécessite un changement d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en valeurs normalisées appartenant à un intervalle réduit ([-1,1] ou [0,1]).

4.6.3. Fuzzification :

C'est l'opération de projection des valeurs des grandeurs physiques normalisées sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées.

4.6.4. Traitement des prémisses composées :

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « ET », « OU » et « NON ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conormes triangulaires, aux opérateurs min et max. Quant à la négation A^c d'un ensemble flou A , elle est caractérisée par :

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{4.9}$$

4.6.5. Inférence floue :

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle R de la forme « **Si** X est A et $2 X$ **Alors** Y est B ». En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- L'implication de Mamdani (1974) :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{4.10}$$

- L'implication de Larsen (1980) :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \tag{4.11}$$

4.6.6. Agrégation des règles :

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur OU. En pratique, on utilise l'opérateur *max* :

$$\mu_{B'}(y) = \max(\mu_{B'_i}(y)) \quad i = 1, \dots, N \tag{4.12}$$

4.6.7. Défuzzification :

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi, il existe plusieurs méthodes [17], parmi lesquelles :

- Méthode du maximum,

- Méthode du barycentre,
- Méthode de la somme pondérée.
- Méthode de centre de gravité.

4.6.8. Dénormalisation :

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en valeurs appartenant à leur domaine physique respectif.

La structure d'un système flou est présentée en **figure (4.4)**.

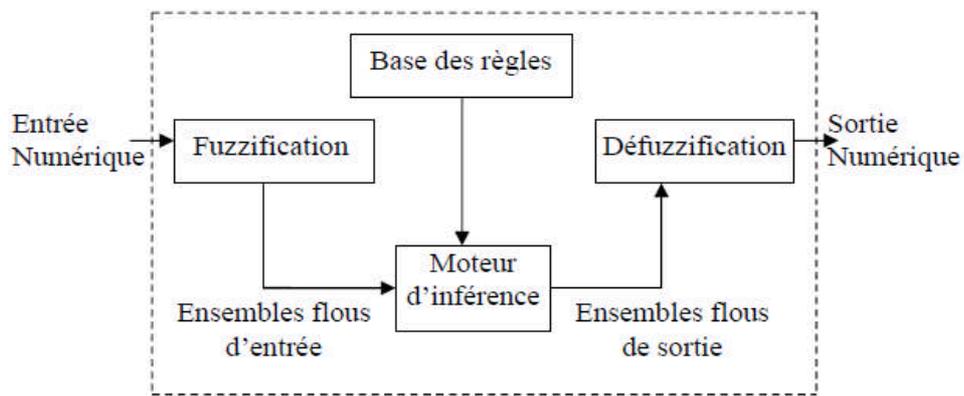


Fig. 4.4. Structure générale d'un système flou.

4.6.9. Système flou de type Mamdani :

Dans un système flou de type Mamdani (Conventionnel) les règles sont de type :

$$R(i, j, k) : \text{Si } x \text{ est } A_i \text{ et } y \text{ est } B_j \text{ Alors } z \text{ est } C_k$$

Où A_i , B_j et C_k représentent des termes linguistiques auxquels est attribuée une signification floue que l'on suppose normalisée.

Pour des entrées numériques précises, x_0 et y_0 , un sous-ensemble flou de sortie, noté F , est généré selon la relation :

$$\mu_F(z) = \max_{(i,j,k) \in I} \min(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0), \mu_{C_k}(z)) \tag{4.13}$$

μ est appelée fonction d'appartenance.

L'opération $\max_{(i,j,k) \in I}$ correspond à l'application de l'opérateur max sur l'ensemble des règles actives. La valeur numérique de sortie délivrée par le système flou est obtenue par défuzzification, classiquement implantée par la méthode du centre de gravité :

$$Z = \frac{\int Z \mu_F(z) dz}{\int \mu_F(z) dz} \tag{4.14}$$

Dans ce type de systèmes flous, la prémisse et la conclusion sont floues. Après l'inférence, le résultat est un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Afin d'obtenir la valeur réelle de la commande à appliquer il faut passer par une étape de «défuzzification».

Les règles de la commande floue « Si-Alors » sont obtenues à partir de l'expertise d'un opérateur. Quoique la performance d'une telle technique de commande soit généralement satisfaisante en pratique le non garanti de la stabilité du système de commande en boucle fermée est souvent critiquée.

4.6.10. Commande par couple calculé flou :

La forte dépendance de la commande par le couple calculé du modèle dynamique du manipulateur, rend celle-ci très sensible aux incertitudes de modélisation et aux perturbations extérieures [10]. Pour pallier au manque de robustesse, est développée dans cette section une approche de robustification très avantageuse.

En général, le vecteur des couples de Coriolis, centrifuges et de gravité noté H est très compliqué, par conséquent, très difficile à modéliser. C'est la raison pour laquelle une loi de commande robuste est synthétisée en gardant la même structure que celle du couple calculé dit classique. Le choix d'une loi de commande pour un système à dynamique compliquée s'établit sur plusieurs critères. Ceux que nous privilégions sont la robustesse et la simplicité de mise en œuvre pour une implémentation en temps réel. Aussi nous nous intéressons aux techniques de commande par *la logique floue*. Pour cela, est proposée la loi de commande suivante :

$$\Gamma = \mathbf{M}(\mathbf{q}) (\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{k}_{vf} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_{pf} \mathbf{e}) + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \tag{4.15}$$

Où : \mathbf{k}_{vf} et \mathbf{K}_{pf} représentent des gains de commande variables. Ce sont des coefficients adaptés fournis par un système flou pour compenser les parties négligées du modèle dynamique. Les règles d'inférence utilisées sont les suivantes :

Règle 1 : si $\|e\|$ est **Z** alors k_{pf} est **Z**,

Règle 1 : si $\|e\|$ est **P** alors k_{pf} est **P**,

Règle 2 : si $\|e\|$ est **M** alors k_{pf} est **M**,

Règle 3 : si $\|e\|$ est **G** alors k_{pf} est **G**.

Où les symboles **Z**, **P**, **M** et **G** sont des variables linguistiques qui signifient, respectivement, nul, petit, moyen et grand. Le même raisonnement est appliqué à k_{vf} en considérant $\|\dot{e}\|$.

Etant donné les valeurs de $\|e\|$ et de $\|\dot{e}\|$ à un instant t , les valeurs des gains de commande sont déduites en utilisant les quatre règles floues, précédemment définies, et la défuzzification par centre de gravité (*centroid*). Cette stratégie de détermination des gains de commande présente les avantages suivants, par rapport aux gains fixes :

- Un grand gain est appliqué seulement lorsque l'écart est grand ;
- Si l'écart est faible, le gain sera également faible.

Les figures 4.5 et 4.6 représentent, respectivement, le schéma structurel du système flou utilisé (du type MAMDANI) et la fonction d'appartenance servant à fuzzifier les entrées et défuzzifier les variables linguistiques.

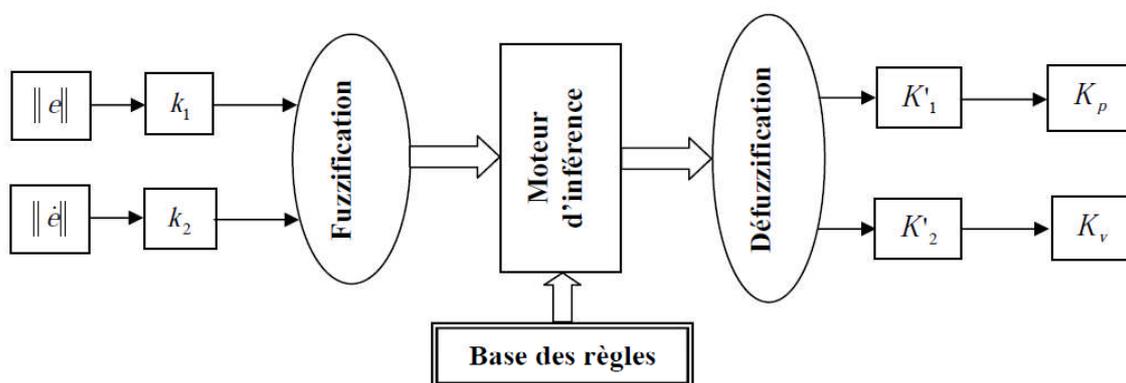


Fig. 4.5. Structure du système flou.

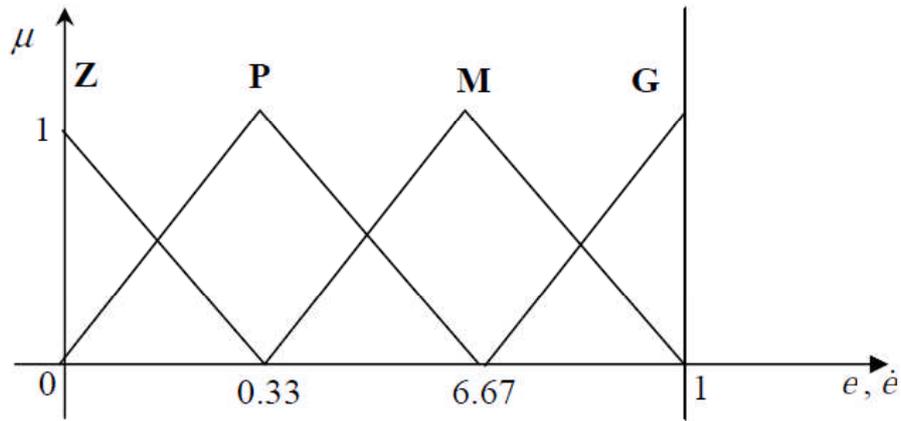


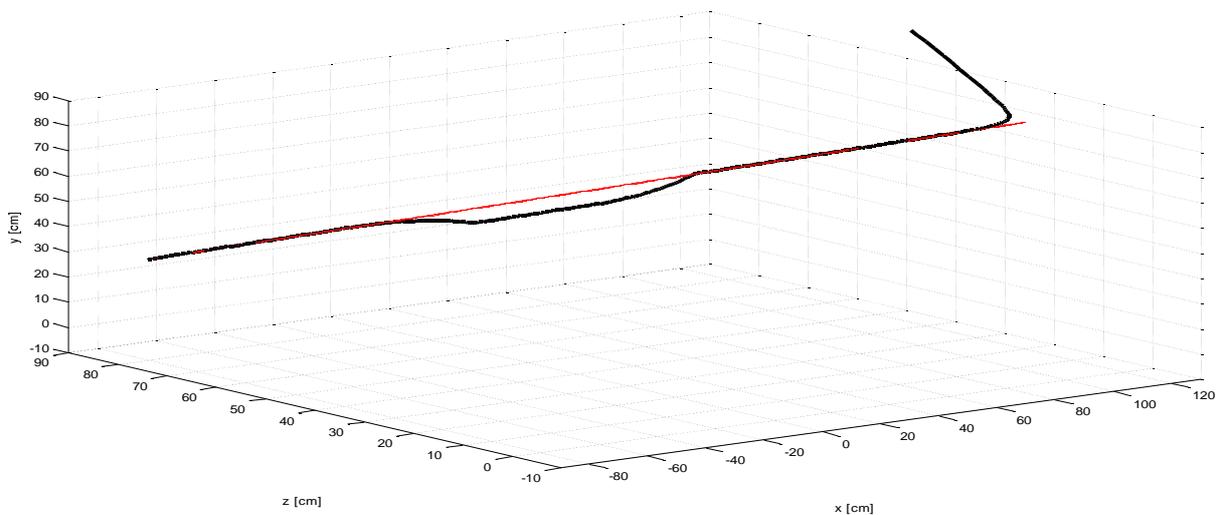
Fig. 4.6. Fonctions d'appartenance associées aux entrées et sorties du système flou.

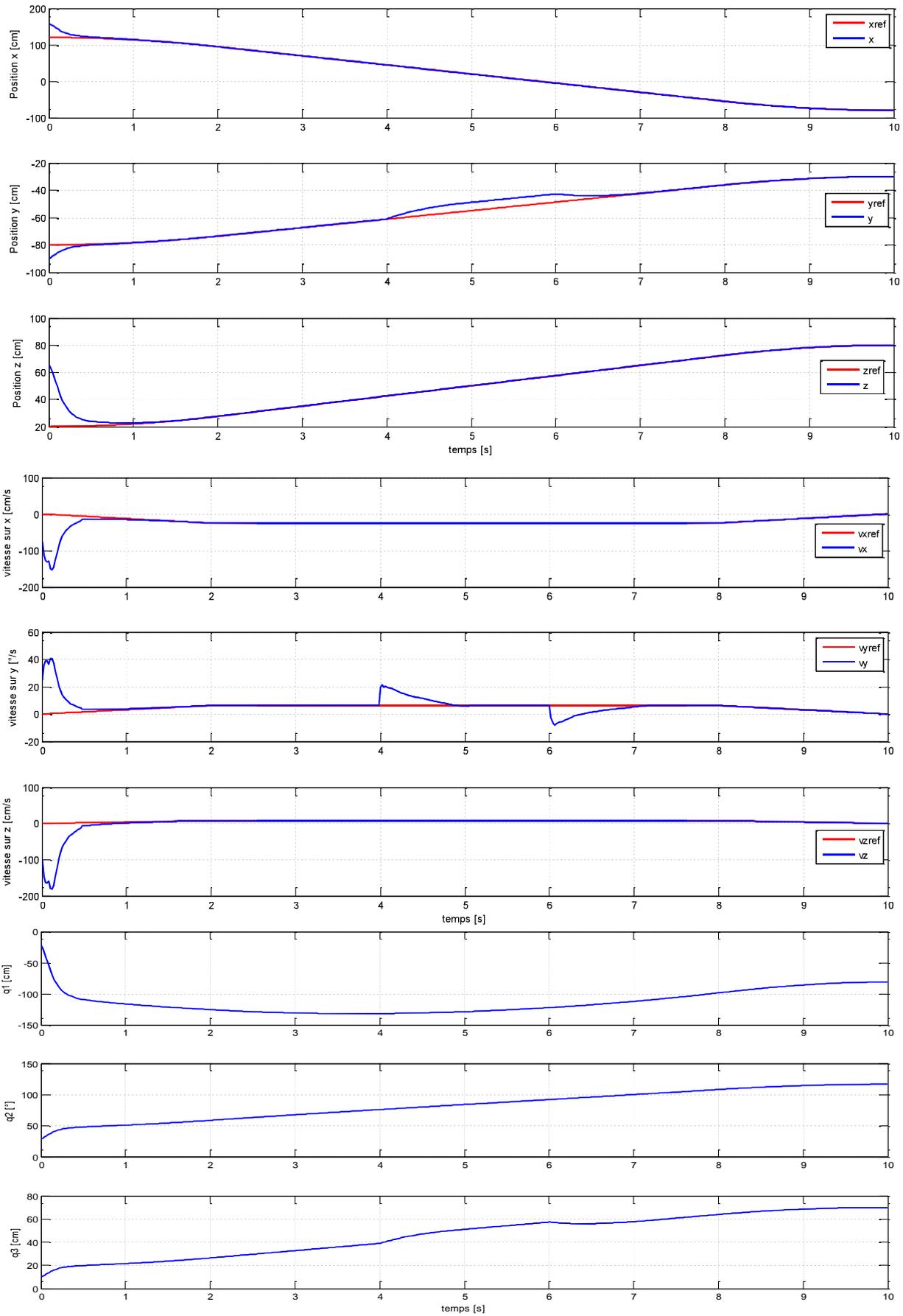
Cela présente une solution potentielle au problème d'élargissement de la bande passante du système, ce qui induirait une forte sensibilité aux incertitudes de modélisation et aux bruits de mesures d'une part, d'autre part, les gains adaptatifs permettent le lissage des efforts de commande évitant ainsi, toute forte sollicitation des actionneurs.

Simulation et discussion :

La même situation de défaillance et le même indice de performance que ceux de la commande par couple calculé, sont considérés.

Les résultats de simulation sont donnés à la figure 4.7.





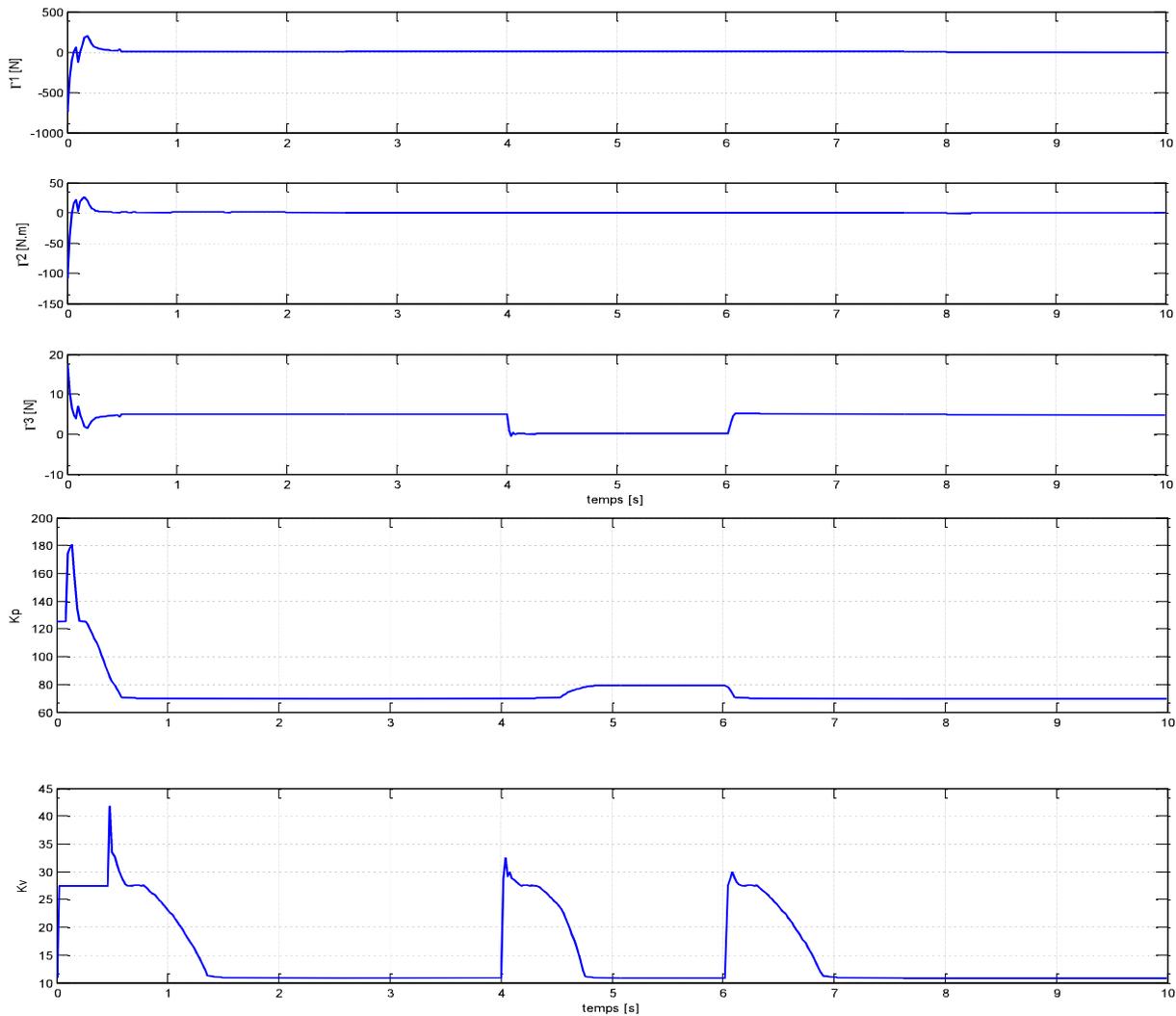


Figure 4.7 : Réponse du système en situation de défaillance ($s= 27.96 \%$).

D'après les résultats de simulation donnés à la figure 4.7, il est clair qu'en situation de défaillance, les propriétés d'atteignabilité sont satisfaisantes. De plus, l'analyse des courbes relatives aux efforts développés montre qu'ils sont admissibles et loin des limites des actionneurs bien qu'ils soient affectés sensiblement par la perturbation.

4.7. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la commande du robot HC proposé au chapitre II. Nous avons cité quelques techniques de commandes connues dans la littérature dédiée à la commande des robots puis détaillé la commande par couple calculé, objet du travail, comme approche idéale pour la commande des robots. Cette technique de commande a été appliquée au robot dans l'objectif de suivre une trajectoire rectiligne.

Les résultats de simulations ont montré, dans le cas de la commande par couple calculé, que les propriétés d'atteignabilité, exigée en robotique industrielle, sont effectives et que les mouvements opérationnels et articulaires sont continus avec des efforts de commande admissibles. De plus, la technique de commande par couple calculé flou s'avère plus robuste aux incertitudes de modélisation.

Conclusion générale

Le travail développé dans ce projet porte sur la modélisation et la commande d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté PRP ayant une structure SCARA en utilisant la commande par couple calculé flou.

Les modèles géométriques et cinématiques directs et inverses ont été établis en exploitant essentiellement la structure du bras manipulateur et la technique de description de la géométrie des robots par les paramètres de Denavit-Hartenberg. Les modèles obtenus décrivent, le passage entre l'espace articulaire propre au robot et l'espace opérationnel propre à la tâche.

Les tâches industrielles robotisées doivent être d'abord planifiées ensuite réalisées, en respectant un certain nombre de contraintes imposée par le cahier des charges afin d'assurer un meilleur suivi de la trajectoire désirée et obtenir un produit de meilleure qualité.

Pour générer la trajectoire de l'outil dans l'espace opérationnelle, la position et l'orientation de l'outil ainsi que leurs vitesses et accélérations sont calculées en fonction de paramètres plus simples, lesquels suivent en fonction du temps, la loi Bang-bang avec palier de vitesse.

Afin de tester le fonctionnement du robot, et quelques propriétés fondamentales de ce dernier comme l'atteignabilité, nous avons choisi d'appliquer deux techniques de commande non linéaire avec une même loi de commande : la commande par couple calculé conventionnelle et la commande par couple calculé avec utilisant un système flou.

A la lumière des résultats de simulation obtenus pour les deux techniques : conventionnelle et par la logique floue, il faut noter qu'en l'absence des perturbations, le système de commande assure de bonnes performances en poursuite de trajectoire.

Cependant, vu les perturbations et la complexité flagrante du modèle dynamique sur lequel est basé le calcul de la commande par couple calculé, celle-ci est rendue très sensible aux incertitudes de modélisations qui sont inévitables. En situation de défaillance, l'utilisation d'un système flou pour cette commande est capable de maintenir des performances acceptables.

Au final, le présent travail met l'accent sur l'apport des systèmes flous dans la robustification de la loi de commande par couple calculée conventionnelle.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de traiter la question de la commande en force où le robot entrerait en interaction avec l'environnement, en gardant la même loi de commande.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Henri chajmo wicz ., « modélisation et simulation numérique de structure articule », obtenir docteur de l'école nationale des ponts et chaussées, 24/2/2011.
- [2] : KAHOUL Nadir., « Étude et conception d'un robot marchant », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de titre magister en électronique, 03/06/2014.
- [3] : mémoire online. « Études de différentes lois de commande pour un robot manipulateur à 6ddl comportant une liaison prismatique », mémoire online, 2015.
- [4] : Laëtitia Matignon., « Introduction à la robotique GREYC-CNRS », Université de Caen France. L'obtention de Licence 1ère année -2011/2012.
- [5] : Mme S.BORSALI., « Modélisation des robots »,L'obtention de Master automatique, Université Abou beker belkaid-Tlemcen, 2012.
- [6] : Ignacio Herrera aguilla. « Commande des bras manipulateur et retour visuel pour des applications à la robotique du service », thèse doctorat, l'université de Toulouse 3, spécialité robotique 2007.
- [7] : Jacques Gangloff ., « cours de Robotique », ENSPS 3A MASTER ISTI.
- [8] : Bétemps M, Jutard A, « Analyse et modélisation des robots manipulateurs ».
- [9] : Oscar Andrés VIVAS Albàn, thèse de doctorat « contribution à l'identification et à la commande des robots parallèle. »L'université de MONTPELLIER II, le 10 novembre 2004.
- [10] : SPONG M.W., VIDYASAGAR M., « Robot Dynamics and control », Quinn-woodbine, USA, 1981.
- [11] : CRAIG J.J., « Introduction to robotics : machanics and control, 2nd Edition », Addison-Wesley Publishing Company, 1999.
- [12] : KHALIL W., DOMBRE E., « Modélisation, Identification et commande des robots », 2^{ième} Edition revue et augmentée, Hermés publications, Paris, 1999.
- [13] : Charles BOP., « Robotique», Maître de conférences d'université de Mitz, juillet 2012.

[14] : wisama Khalil et Etienne d'ombre. « Base de la modélisation et la commande des robots manipulateur type sérié », Université Numérique Ingénierie Technologie, 08/5/ 2012.

[15] : A.HAMACHE, M.O. BENSIDHOUM, H.CHEKIREB(2016). « Adaptative sliding mode with time delay control based on convolutions for power reference tracking using VSC-HVDC system ». Turkish journal of electrical Engineering and Computer Sciences, 2016, ISSN : 1300-0632, Vol.25, No.2, 2017, pp.22149-2162.DOI :39.6/elk-1602-277.

[16] : A.HAMACHE, M.O. BENSIDHOUM, H.CHEKIREB(2016). « Sling Mode Control with Time Delay Disturbance Estimator for power Flow Control Using VSC-HVDC », Mediterranean journal of Measurement and Control, 2016, ISSN : 1743-9310, Vol.12, No.2, 2016, pp. 580-588.

[17] : HAMIZI Abdelhakim., «Commande Adaptative Floue Type-2 d'un Bras Manipulateur », Ingénieur d'état en électronique, Université de BATNA faculté de technologie département d'électronique, 2011/2012.