



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et Sécurité industrielle

Département : Maintenance En Instrumentation

Mémoire

Pour l'obtention de diplôme de master

Filière : Génie industrielle

Spécialité : Génie industrielle

Thème

**Etude d'un Robot Cartésien à deux
degré de Liberté**

Présenté par

Djakhdane Nour El Houda

Bouchibane Youcef

Encadré par :

Mr KACIMI Abderrahmane

Année universitaire 2021 /2022

Remerciements

*Nous rendons nos profondes gratitudee à dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail. Nous exprimons nos profondes gratitudee à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré. Nous remercions nos encadrant **Mr. KACIMI Abderrahmane** pour les efforts qu'il a déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger. Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A

Aux deux êtres humains qui sont les plus chers dans ma vie

*Ma lumière, celle qui m'a donné la vie, l'amour, la tendresse et le courage, toi
Chère maman*

Fatiha

*Celui qui m'a soutenu et guidé afin que je puisse arriver a cette étape de Ma
vie, toi*

Cher père

Abed

A

Mes chers frères : Mahmoud ,Saad ,Larbi

Mes chères sœur :Tata , Nessrine Nour El Imane

A

Me s copines : Ibtissame ,Nour el Houda

A

Mon binôme : Youcef

A

Tous mes amis sans exception

Tous ceux qui m'ont aidéde près ou de loin.

Nour El Houda

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A

Aux deux êtres humains qui sont les plus chers dans ma vie

Ma lumière, celle qui m'a donné la vie, l'amour, la tendresse et le courage, toi

Chère maman

Saadia

Celui qui m'a soutenu et guidé afin que je puisse arriver a cette étape de Ma

vie, toi

Cher père

Mekki

A

Mes chers frères et Mes chères sœur

A

Tout la famille Bouchibane

A

*Mon binôme : **Nour el Houda***

A

Tous mes amis sans exception

Youcef

Symboles et abréviations

X : La situation de l'organe terminal

R : la résistance de l'induit du MCC,

L : inductance

(t) : la force électromotrice,

$\Omega(t)$: qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor

Ke : est la constante électromagnétique (en Vs/ra)

(t) : est le couple moteur

$Cr(t)$: est le couple résistant (charge et perturbations)

F : le coefficient de frottement visqueux

J : le moment d'inertie du rotor

$I(t)$: courant qui alimente le moteur

(Φ) : flux magnétique

m : la masse totale

(t) : la tension aux bornes de l'induit (rotor)

(Bs) : champ inducteur

q_j : La variable articulaire

Rot : rotation

$Trans$: translation

q_j : La variable articulaire

Γ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires,

q : Vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : les efforts extérieur (fores et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

θ : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaire.

$K(q, \dot{q})$ l'énergie cinétique

$U(q)$: L'énergie potentielle

$L(q, \dot{q})$: Le Lagrangien

τ : Vecteur des couples généralisées

τ : Vecteur des couples appliqués aux articulations $\in R^n$

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires $\in R^n$

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires $\in R^n$

q : Vecteur des positions articulaires $\in R^n$

$M(q)$: Matrice d'inertie $\in R^{n \times n}$

$G(q)$: Vecteur de forces de gravité $\in R^n$

$C(q, \dot{q})$: Matrice des forces centrifuges et de Coriolis $\in R^{n \times n}$

$f(\dot{q})$: Frottement

F_v : la matrice de coefficient du frottement visqueux

f_s : un terme de frottement sec

τ_d : De perturbations ou bien des couples résistants

$G(q)$: forces de gravité.

Table des matières

Remerciements

Symboles et abréviations

Introduction générale	13
Chapitre I : Généralités sur les robots	16
I.1 Introduction	17
I.2 Définitions	17
I.2.2 Robotique	17
I.2.2 Robot	17
I. 2. 3 Robot industriel	17
I.3 Historique	18
I.4 Types des robots :	19
I.4.1 Robots mobiles	20
I.4.2 Un robot manipulateur	20
I.5 Les éléments constitutifs d'un robot	20
I.5.1 Unité informationnelle	21
I.5.2 Unité opérationnelle	21
I.6 Architecture des robots manipulateurs :	21
I.6.1 L'organe terminale	22
I.6.2 Structure mécanique articulée	23
I.6.3 Articulations	23
I.6.3.1 Articulation rotoïde (notée R)	23
I.6.3.2 Articulation prismatique (notée p)	23
I.7 Classification des robots :	24
I.7.1. Classification fonctionnelle :	24
I.7.1.1 Manipulateur à commande manuelle	24
I.7.1.2. Manipulateur automatique :	25

I.7.1.3. Robots programmables :	25
I.7.1.4. Robots intelligents.....	26
I.7.2 Degrés de liberté et architecture (Classification géométrique).....	26
I.8. Redondance	27
I.9 Description et types de robots	27
I.9.1 Le robot série	28
I.9. 2 Le robot parallèle	28
I.9. 3 Le robot cartésien et le robot SCARA	29
I.9. 4 Les robots redondants à sept ddl	29
I.10 Critère de choix d'un robot	30
I.11 Domaines de la robotique	31
I.12 Avantages et inconvénients.....	31
I.12.1 Avantages.....	31
I.12.2 Inconvénients	32
I.13 Conclusion	32
Chapitre II : Actionneurs et Capteurs en robotique	33
II.1. Introduction.....	34
II.2. Actionneurs.....	34
II.2.1. Définition	34
II.2.2. Les différents actionneurs	34
II.2.2.1. Actionneur pneumatique	35
II.2.2.2. Actionneur hydraulique	36
II.2.2.3. Actionneur électrique	36
II.1.2.3.1. Moteur à courant continu	36
II.1.2.3.2 Constitution.....	37
II.1.2.3.3 Structure de la machine à courant continue.....	37
II.1.2.3.4 Principe de fonctionnement.....	40
II.1.2.3.5 Circulation de flux magnétique :	41

II.3. Les capteurs.....	44
II.3.1. Définition.....	44
II.3.2 Principales fonctions des capteurs	44
II.3.2.1 Les capteurs internes	44
II.3.2.2 Les capteurs externes	45
II.3.3 Les type de capteurs	46
II.3.3.1 Les Capteurs actifs.....	46
II.3.3.2 Les capteurs passifs	46
II.3.4 Les familles des capteurs	46
II.2.4.1 Capteur TOR (tout ou rien)	46
II.3.4.2 Capteurs analogiques	47
II.3.4.3 Capteurs numérique.....	47
II.4 Relation capteurs actionneurs	47
II.5. L'encodeur.....	48
II.5.1. Les différents types des encodeurs	48
II.6. Conclusion.....	49
Chapitre III : Modélisation en robotique	50
III .1 Introduction	51
III.2 Structure géométrique des robots	51
III.3 Modèles géométriques	51
III.3.1 Modélisation géométrique directe	51
III.3.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du robot cartésien de 2ddl.....	53
III.3.2 Modélisation géométrique inverse	54
III.3.2.1 Méthode de calcul du modèle géométrique inverse.....	55
III.4. Modélisation cinématique	56
III.4.1 Modèle cinématique directe (MCD)	57
III.3.2 Modèle cinématique inverse (MCI).....	57

III.5 Modélisation dynamique	57
III.5.1 Le modèle dynamique direct	58
III.5.2 Modèle dynamique inverse.....	58
III.5.3 Formulation de Lagrange-Euler	59
III.5.4 L'énergie cinétique	59
III.5.5 L'énergie potentielle	63
III.5.6 Les équations de mouvement du robot.....	63
III.6 Les propriétés des équations dynamiques d'un robot manipulateur	66
III.6.1 Propriétés de la matrice d'inertie	66
III.6.2 Propriétés de la matrice des forces centrifuges et de Coriolis.....	67
III.6.3 Propriétés du vecteur de gravité	68
III.6.4 Propriétés du vecteur des frottements.....	69
III.6.5 Propriétés du vecteur des perturbations.....	69
III.7 Conclusion	70
Chapitre IV : commandes et simulations	72
IV.1 Introduction	73
IV.2 Commande en régulation proportionnel dérivée avec compensation de gravité.....	73
IV.2.1 Application de la commande sur le robot cartésien 2ddl	73
IV.2.2 Schéma de simulation de la commande en régulation	75
IV.3 Résultats et commentaires	76
IV.4 Commande en poursuite proportionnel dérivée sans compensation de gravité	77
IV.5 Conclusion.....	82
Conclusion générale et perspectives	83
Bibliographie	84

Chapitre I : Généralités sur les robots

Figure I. 1. Le PUMA UNIMATION. [6]	19
Figure I. 2. Robot mobile	20
Figure I. 4. Robot manipulateur	20
Figure I. 5. Structure constituant unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [8].:	21
Figure I. 6. Constituants mécaniques des robots	22
Figure I. 7. Symbole de l'articulation rotoïde	23
Figure I. 8. Symbole de l'articulation prismatique	24
Figure I. 9. Manipulateur à commande manuelle. [10]	24
Figure I. 10. Manipulateur d'usine Main automatique	25
Figure I. 11. Robot programmable.	25
Figure I. 12. Robot intelligent. [12]	26
Figure I. 13. Architecture des porteurs	27
Figure I. 14. Structures générales d'un robot-manipulateur	27
Figure I. 15 Robot série	28
Figure I. 16. Robot parallèle	29
Figure I. 17. Le robot cartésien et le robot SCARA	29
Figure I. 18. Les robots redondants à sept ddl	30

Chapitre II : Actionneurs et Capteurs en robotique

Figure II. 1. Schéma fonctionnel et symboles des actionneurs	35
Figure II. 2. Vérin à simple effet .	35
Figure II. 3. Vérin à double effet.	36
Figure II. 5. Actionneur pneumatique.	36
Figure II. 6. Actionneur hydraulique.	36
Figure II. 7. Structure générale d'une MCC.	37
Figure II. 8. Composition de stator	38
Figure II. 9. Composition de l'induit.	39
Figure II. 10. Collecteur	39
Figure II. 11. Balais et porte balais	40
Figure II. 12. Principe de fonctionnement de MCC	41
Figure II. 13. Distribution de flux	41
Figure II. 14. Schéma équivalent du MCC	42
Figure II. 15. Schéma bloc d'un MCC.	44
Figure II. 16. Schéma synoptique d'un capteur de pression.	44

Chapitre III : Modélisation en robotique

Figure III. 1 . Structure géométrique d'un robot à chaîne cinématique ouverte	51
Figure III. 2. Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple	52
Figure III. 3. Schéma descriptif du robot cartésien 2ddl.	53
Figure III. 4. robot cartésien 2ddl	69

Chapitre IV : commandes et simulations

<i>Figure IV. 1. Réponse en position des joints 1 et 2</i>	76
<i>Figure IV. 2. signaux des vitesses pour les deux joints.</i>	76
<i>Figure IV. 3. signaux de commandes pour les deux joints.</i>	77
<i>Figure IV. 4. réponse en position des joints 1 et 2.</i>	81
<i>Figure IV. 5. signaux des vitesses pour les deux joints.</i>	81
<i>Figure IV. 6. signaux de commandes pour les deux joints.</i>	81

Liste de tableaux

Chapitre II : Actionneurs et Capteurs en robotique

<i>Tableau II. 1 principales fonctions des capteurs. (*) concerne les fonctions de base impérativement présentes sur tout robot asservi. [18]</i>	46
---	----

Chapitre III : Modélisation en robotique

<i>Tableau III. 1 paramètres de 'DENAVID-HARTENBERG' pour cartésien de 2DDL</i>	54
---	----

Introduction générale

Introduction Générale :

Quand nous parlons de la robotique, plusieurs idées viennent à l'esprit de chacun de nous. Historiquement, nous pourrions nous référer aux premiers concepts et automates de l'antiquité ou aux premiers robots comme à des personnages de la mythologie. Même le mot robot a sa propre histoire. Séparer la science de la science-fiction n'est pas une chose aisée, surtout lorsqu'en robotique nous cherchons parfois à faire la réalité par la fiction.

Les robots étaient conçus en respectant les contraintes imposées par le milieu industriel, comme la précision dans la réalisation des tâches, le respect des cadences de production, etc. Prenons l'exemple des robots manipulateurs industriels des années 80 très semblables aux robots industriels actuels, ils se déplacent à très grandes vitesses sur des trajectoires calculées hors ligne dans des environnements protégés et structurés, sans interaction avec les opérateurs humains.

C'est avec les développements scientifiques, spécifiquement de l'électronique et de l'informatique mais aussi de l'automatique, les mathématiques, la mécanique et la mécanique des matériaux, que la technologie robotique a progressée. Les robots actuels sont dotés d'une « intelligence » qui leur donne une certaine autonomie qui va leur permettre de se diffuser dans de nouveaux domaines. [1]

L'objectif de notre travail consiste à commander un robot cartésien à deux degrés de liberté par un régulateur proportionnel dérivée.

De nos jours la commande des robots manipulateurs constitue un des axes prépondérants de la recherche en robotique. Cela est dû aux difficultés posées par ce genre de systèmes, notamment :

Les dynamiques hautement non linéaires du robot et éventuellement des actionneurs, incluant les effets inertiels, gravitationnels, centrifuges et de Coriolis, ainsi que les frottements, les jeux mécaniques et les flexibilités.

L'existence de couplages entre les entrées et les sorties du système.

Les paramètres variant dans le temps, par exemple du fait dû au changement de la charge manipulée par le robot, ou du fait dû aux changements de sa configuration, et de ses vitesses de mouvement.

En effet, la commande de ce type de systèmes pose beaucoup de problèmes aussi bien en théorie qu'en pratique. Parce que ces systèmes ne disposent pas d'outils et de techniques généraux permettant de synthétiser leurs commandes. La commande des robots manipulateurs a fait l'objet de nombreux travaux est devenue un domaine de recherche très important et très vaste. Au cours de

ces dernières décennies, plusieurs approches de commandes ont été établies. Parmi ces commandes, on trouve celles qui ne sont pas basées sur le modèle, à savoir, commande de type PD. Pour ce type de commande, le robot manipulateur est considéré comme un système linéaire et chacune de ses liaisons est asservie de manière classique indépendamment des autres.

La commande PD (Proportionnelle et Dérivée) est la plus simple commande, elle assure la stabilité asymptotique globale de la dynamique du robot en boucle fermée mais en utilisant des grands gains.

Pour remédier à ce problème, nous faisons appel à une commande de type PD avec compensation des forces de gravité $G(q)$, cette commande assure la stabilité asymptotique de la dynamique du système en boucle fermée avec une erreur d'état permanente nulle.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre, présente des généralités sur les robots industriels et en particulier les robots manipulateurs, leur architecture et leur classification, ainsi que les domaines d'applications, sont brièvement discutés.

Le deuxième chapitre, nous donnerons des détails sur les capteurs et les actionneurs qui présentent le noyau des robots.

Au troisième chapitre, ce chapitre sera consacré aux modélisations des robots après avoir rappelé les principes et les méthodes de la modélisation.

Dans le contenu du quatrième chapitre, nous avons proposés la commande PD avec deux stratégies différentes, la régulation et la poursuite.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale, présentant le bilan de ce travail, ainsi que les Perspectives envisagées.

Chapitre I :

Généralités sur les

robots

I.1 Introduction

Depuis la naissance de l'industrie robotisée, les robots industriels ont été conçus afin de remplacer les humains dans des tâches répétitives, fatigantes et qui impliquent souvent un travail manuel dangereux. Actuellement, grâce à l'augmentation de la production et à la diminution des prix, les robots industriels sont utilisés dans une infinité d'applications.

La robotique en général joue un rôle très important dans le secteur industriel et aussi de plus en plus dans les secteurs de services comme l'entretien, l'exploration, la médecine.

Les structures, formes et fonctionnalités de ces robots doivent être adaptées à l'environnement avec lequel ils interagissent.

I.2 Définitions

I.2 .1 robotique

La branche de la technologie qui traite la conception, la construction, l'exploitation et l'application des robots. [2]

La robotique est une science qui s'intéresse aux robots. En fait, il s'agit d'un ensemble de disciplines techniques (mécanique, électronique, automatique, informatique) articulées autour d'un objectif et d'un objet communs. Cet objectif est l'automatisation flexible de nombreux secteurs de l'activité humaine réputés jusqu'à très récemment comme ne pouvant se passer de la présence de l'homme, et l'objet est le robot, sorte de machine universelle, dont l'homme rêve depuis toujours pour le remplacer dans les tâches difficiles.[3]

I.2.2 Robot

Appareil automatique à plusieurs degrés de liberté capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable. [4]

I.2.3 robot industriel

Un robot est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, 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 de tâches, il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminent 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'autre fonction sans modification permanente du matériel.

Un robot est un système mécanique poly-articulé mû par des actionneurs et commandé par un ordinateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches. Il est également défini comme étant une machine capable d'effectuer des tâches et de manipuler des objets selon un programme de façon automatique. Ils sont généralement utilisés pour remplacer les humains dans des situations où ces derniers sont incapables d'effectuer le travail, des situations plus dangereuses, de haute précision ou répétitive. [5]

I.3 Historique

➤ Le mot robot a été présenté en 1921 par le dramaturge tchèque Karel Capek dans sa pièce satirique R. U. R (Universal Robots de Rossum).

➤ Un manipulateur de broyage de récipients en verre a également été ajouté aux téléopérateurs en 1949.

➤ Les premiers robots, développés par « George Devol » en 1954, ont remplacé le manipulateur maître du téléopérateur avec la possibilité de programmation avec CNC (un utile de contrôle de périphérique).

➤ Les droits de brevet ont été achetés par « Joseph Engelberger », étudiant à l'Université de Columbia, qui a par la suite fondé la société UNIMATION dans le Connecticut en 1956.

➤ UNIMATION a installé son premier robot en une usine de General Motors en 1961. L'innovation clé ici était « la programmabilité » de la machine.

➤ En 1962, Ernst développa un robot à détection de force qui lui permettait d'empiler des blocs, ce système était le premier qui impliquait un robot en interaction avec un environnement non structuré et a conduit à la création du projet MAC (Man And Computer) au MIT (Institut de technologie du Massachusetts).

➤ Un système de vision robot binaire qui a permis au robot de réagir à la présence des obstacles dans son environnement a été développé par McCarthy et ses collègues en 1963.

➤ Un autre robot novateur de l'époque était un robot marcheur développé par General Electric pour l'armée en 1969. Les robots qui répondent aux commandes vocales et des blocs empilés au hasard ont été développés à Stanford et dans d'autres lieux. Les robots font leur apparition au Japon par l'acquisition de Kawasaki d'une licence d'UNIMATION en 1968.

➤ En 1973, le premier langage de programmation de mouvement de robot, appelé WAVE, a été développé à Stanford pour permettre de commander un robot par des commandes de haut niveau.

➤ En 1974, le fabricant de machines à outil « Cincinnati Milacron, Inc. » a présenté son premier manipulateur commandé par ordinateur, appelé The Tomorrow Tool (T3), qui pourrait soulever une charge de 100 livres (45.35 kg) ainsi que de suivre les objets en mouvement sur une chaîne de montage.

➤ En 1978, UNIMATION présente un robot appelé PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly), basé sur une étude de General Motors.

➤ En 1979, le SCARA (Robot articulé conforme sélectif pour montage) a été introduit au Japon puis en États-Unis.

➤ Un robot à entraînement direct a été développé à Carnegie Mellon par Asada en 1981. [6]

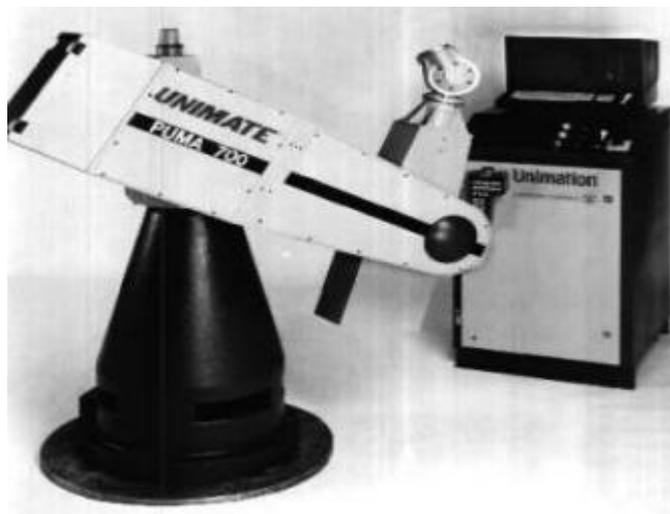


Figure I. 1. Le PUMA UNIMATION. [6]

I.4 Types des robots :

Il existe deux types de robots : robots mobiles et robots manipulateurs.

I.4.1 Robots mobiles :

Ce sont des robots capables de se déplacer dans un environnement, Ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation (les robots explorateurs, les robots de services...)



Figure I. 2. Robot mobile

I.4.2 Un robot manipulateur

C'est des robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise et répétitive. Ce sont des manipulateurs automatiques programmés qui se substituent à l'homme pour l'accomplissement de tâches répétitives, (tels que les bras manipulateur, médicaux, les robots industriels...)



Figure I. 3. Robot manipulateur

I.5 Les éléments constitutifs d'un robot

On peut distinguer deux ensembles interactifs dans un robot en fonctionnement : l'unité informationnelle et l'unité opérationnelle.

I.5.1 Unité informationnelle

Cette partie reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras manipulateur et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de ses tâches. Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanent selon le cycle information-décision-action. [7]

I.5.2 Unité opérationnelle

Cette unité représente les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. En effet, ça constitue le robot physique, qui intègre la structure mécanique (segments, articulations, architecture,...), les modules d'énergie (amplificateurs, variateurs, servovalves....), les convertisseurs d'énergie (moteurs, vérins...), les chaînes cinématiques de transmission mécanique (réducteurs, vis à billes, courroies crantées....), les capteurs proprioceptifs placés sur chaque axe pour mesurer en permanence leur position et leur vitesse, et enfin l'effecteur, ou organe terminal, qui est en interaction avec l'environnement.

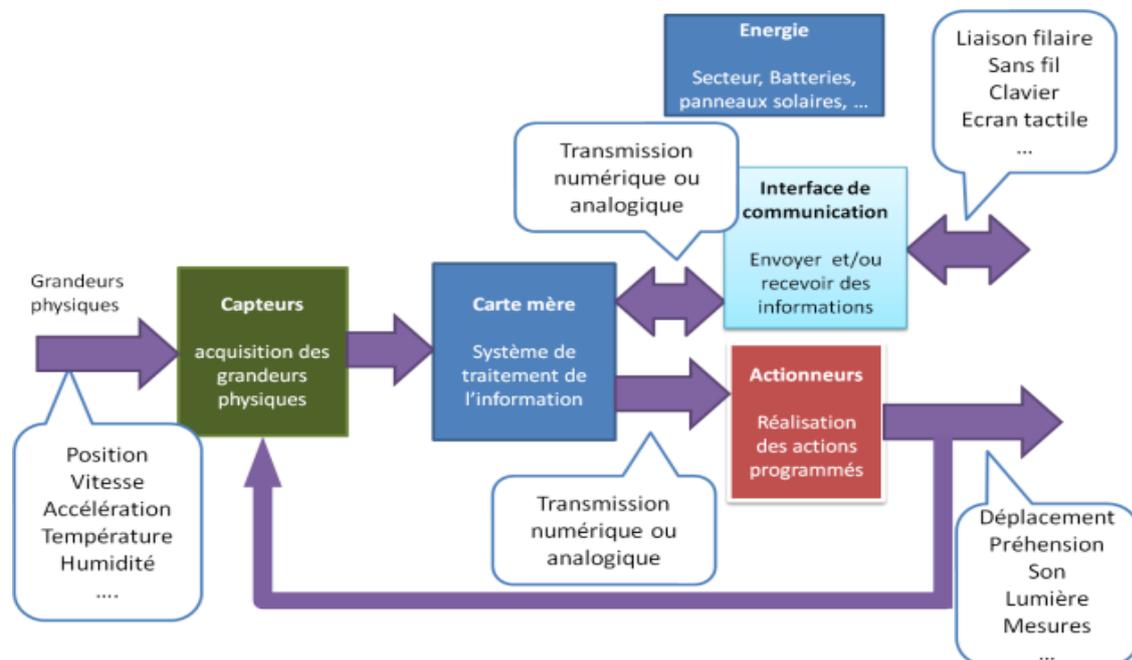


Figure I. 4. Structure constituant unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [8].:

I.6 Architecture des robots manipulateurs :

Un robot-manipulateur est constitué par deux sous-ensemble distincts : un (ou plusieurs) organe terminale et une structure mécanique articulée.

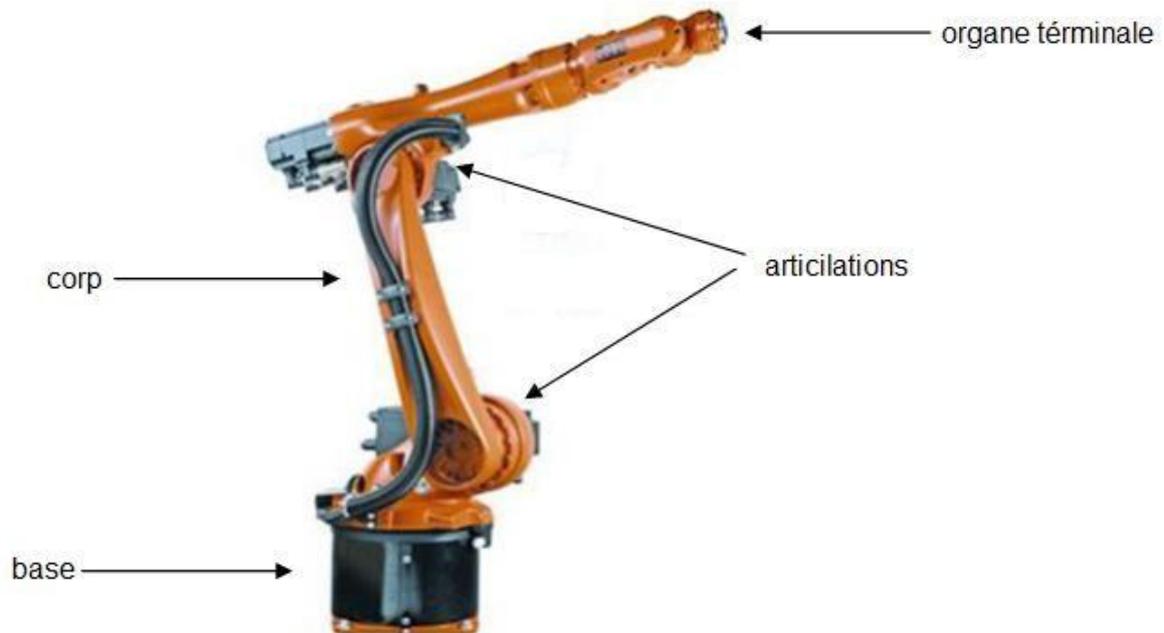


Figure I. 5. Constituants mécaniques des robots

1.6.1 L'organe terminale

Sous le terme organe terminal, on regroupe tous dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression ...) ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture...). Il s'agit donc d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, c'est-à-dire qu'il est équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes.

Il peut aussi être monofonctionnel mais interchangeable, un robot, enfin, peut être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. Par la suite nous utilisons indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique [9].

CORPS (Segment) : C'est le corps principal du robot qui comprend les jonctions, les articulations, et d'autres éléments de structure du robot. Il convient de noter ici que le manipulateur seul n'est pas un robot.

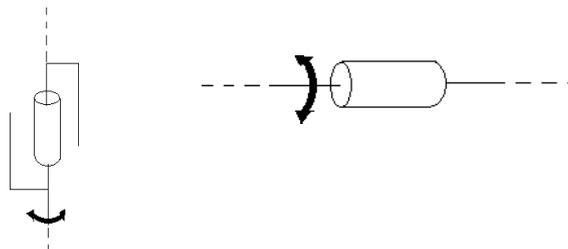
La base : La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

I.6.2 Structure mécanique articulée

Le rôle de la structure mécanique articulée est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération donnée. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides ou supposée comme tels, assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être soit ouvertes simples, soit arborescentes, soit fermées.

I.6.3 Articulations

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degrés de liberté résultant de la mobilité de l'articulation. La mobilité est telle que :



$$0 \leq m \leq 6$$

Figure I. 6. Symbole de l'articulation rotoïde

Lorsque $m = 1$, ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est dite simple, soit rotoïde, soit prismatique

I.6.3.1 Articulation rotoïde (notée R)

Il s'agit d'une articulation de type pivot, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe. L'articulation rotoïde est représentée par le symbole de la figure I.5.

I.6.3.2 Articulation prismatique (notée p)

Il s'agit d'une articulation de type glissière réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La figure I.6 donne sa représentation symbolique.

La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe

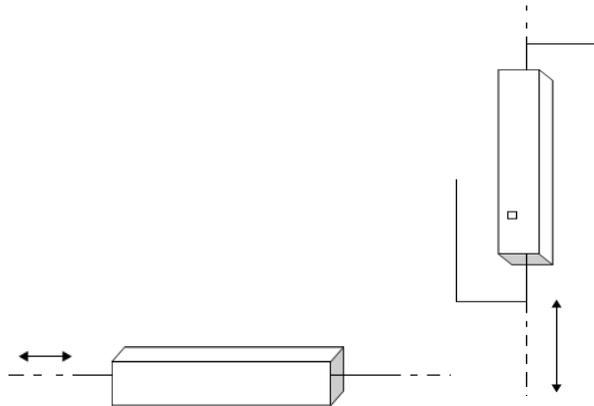


Figure I. 7. Symbole de l'articulation prismatique

I.7 Classification des robots :

On peut classer les robots d'un point de vue fonctionnel ou d'après leur structure géométrique.

I.7.1. Classification fonctionnelle :

Le nombre de classe et les distinctions entre celles-ci varient d'un pays à un autre (6 classes au Japon, 4 en France). L'A.F.R.I. distingue 4 classes décrites ci-dessous :

I.8.1.1 Manipulateur à commande manuelle :

Le manipulateur à commande manuelle conçu et réalisé pour les manipulations particulièrement difficiles, répond spécifiquement aux exigences liées à la manutention de charges élevées, dans tous les points du volume de travail sans effort et dans des conditions optimales d'ergonomie et de sécurité . Cette figure représente les manipulateurs à commande manuelle :

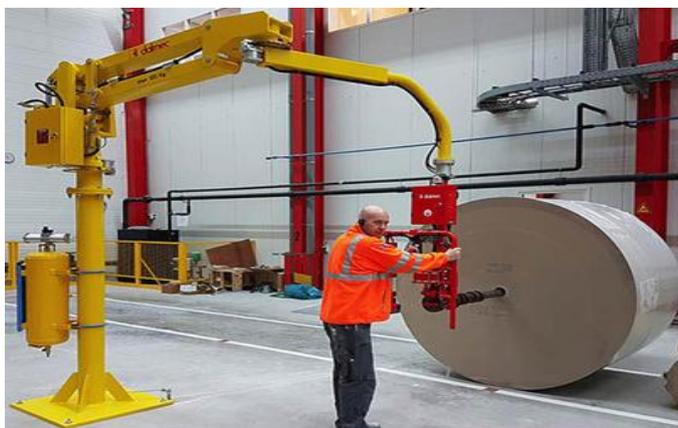


Figure I. 8. Manipulateur à commande manuelle.[10]

I.8.1.2. Manipulateur automatique :

La commande peut se faire par automate programmable on peut distinguer entre manipulateurs à cycle fixe et manipulateurs à cycle programmable.

Cette figure montre un bras manipulateur qui exerce des mouvements de soudure sans l'intervention de l'homme.



Figure I. 9. Manipulateur d'usine Main automatique

I.7.1.3. Robots programmables :

Ils répètent les mouvements qu'on leur a appris ou programmés sans informations sur l'environnement ou la tâche effectuée. On peut aussi faire la distinction entre robots « playback » qui reproduit la tâche apprise et robots à commande numérique qui peuvent être programmés hors-ligne. Pour certains robots, par exemple les robots de peinture, qui doivent suivre une trajectoire complexe et difficile d'être exprimée mathématiquement, un opérateur humain spécialiste de la tâche effectue la trajectoire en guidant le bras du robot à l'aide d'un « pantin », et l'entièreté de la trajectoire est mémorisée par le robot [11].



Figure I. 10. Robot programmable

I.7.1.4. Robots intelligents :

On trouve actuellement des robots qui sont capables d'acquérir et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs d'efforts...) comme le montre la figure suivante les robots de troisième génération sont capables de comprendre un langage oral proche du langage naturel et de se débrouiller de façon autonome dans un environnement complexe grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle [11].

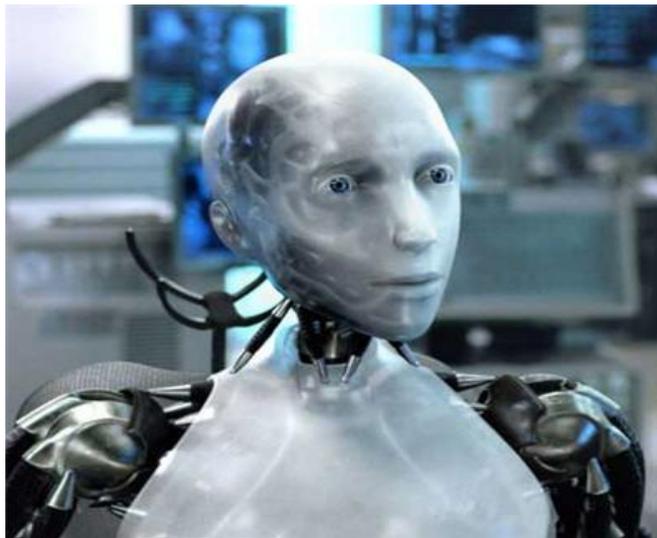


Figure I. 11. Robot intelligent. [12]

I.7.2 Degrés de liberté et architecture (Classification géométrique) :

Un robot non redondant doit disposer de six degrés de liberté pour positionner et orienter un solide quelconque dans l'espace. Toutefois, si ce solide présente une symétrie de révolution, cinq degrés de liberté suffisent puisqu'il n'est pas nécessaire de spécifier la rotation autour de l'axe de révolution de même pour situer un corps dans un plan, il ne faut que trois degrés de liberté : deux fixent les coordonnées dans le plan et le troisième détermine son orientation dans ce plan. A partir de ces constatations, on déduit que : les caractéristiques des solides manipulés par le robot, donc la classe de tâches à réaliser, permettant de déterminer le nombre de degrés de liberté dont il doit disposer une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il y ait compatibilité entre le robot et la tâche et que le nombre de degrés de liberté de l'organe terminale du robot soit supérieure ou égale à celui de la tâche, le mécanisme peut alors placer l'organe terminale dans la situation désirée.

Afin de dénombrer les différentes architectures possibles, on ne considère que deux paramètres : le type d'articulation (rotoïde, prismatique) et l'angle que font deux axes articulaires successifs (0° ou 90°) [13]. L'architecture des porteurs est présentée dans la figure I.12

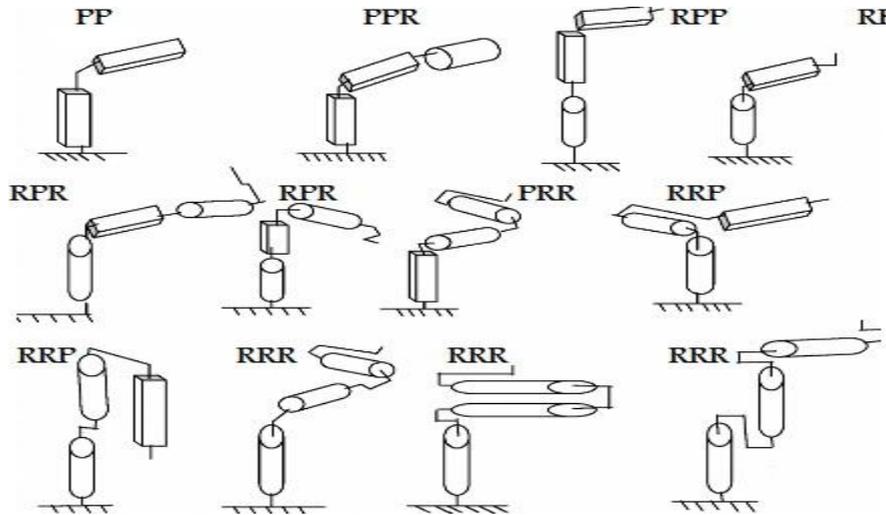


Figure I. 12. Architecture des porteurs

On convient d'appeler les trois premiers degrés de liberté le porteur de robot. Les degrés de liberté résiduels forment le poignet, caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et des masses faibles.

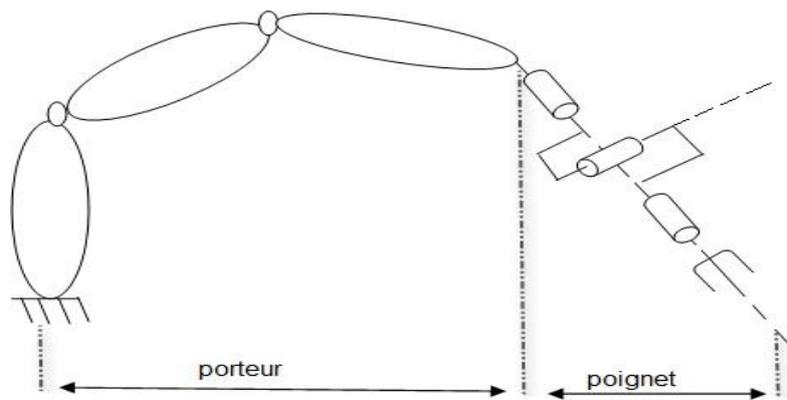


Figure I. 13. Structures générales d'un robot-manipulateur

I.8 Redondance

Un robot est redondant lorsque le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulations motorisées. Cette propriété permet d'augmenter le volume du domaine accessible et de préserver les capacités de déplacement de l'organe terminal en présence d'obstacles le ou les degrés de liberté supplémentaires autorisant leur contournement.

I.9 Description et types de robots

Dans l'espace tridimensionnel, un corps rigide libre peut se déplacer selon six degrés de libertés (ddl): trois translations et trois rotations. On utilise le terme pose pour désigner la localisation du corps par rapport à un référentiel. Une pose est composée d'une position et d'une orientation. Pour placer un corps rigide n'importe où dans l'espace tridimensionnel, on a besoin d'un robot avec minimum six articulations motorisées, c.à.d. d'un robot à six ddl (figure I.1). La grande majorité des robots industriels sont de type série.

I.9.1 Le robot série

Un robot série est composé d'une série de segments reliés par des articulations motorisées rotoïde (en rotation) ou prismatiques (en translation). Dans certaines applications, on n'a pas besoin de déplacer les objets selon six ddl mais seulement selon cinq ou même quatre ou trois ddl. La figure I.14 illustre un robot sériel à cinq ddl utilisé pour la palettisation. Le robot de la figure 1.2a est lui aussi utilisé pour la palettisation, mais il a seulement quatre ddl. Deux mécanismes parallélogrammes servent à restreindre deux des trois ddl en rotation de l'effecteur. Ces trois premiers robots sériels sont de type anthropomorphique.



(a)

Figure I. 14 Robot série

I.9.2 Le robot parallèle

Dans un robot parallèle, l'effecteur est relié à la base via plusieurs < bras >, et la plupart des articulations ne sont pas motorisées figure I.15. Les robots parallèles peuvent eux aussi avoir six, cinq, quatre, trois ou même deux ddl. Les robots parallèles à six ddl les plus connus sont les hexapodes, comme ceux qui déplacent les cockpits des simulateurs de vol. Les robots parallèles

sont généralement plus rigides et plus rapides que les robots séries. En revanche, ils sont beaucoup plus difficiles à étudier et il en existe de milliers d'architectures différentes.

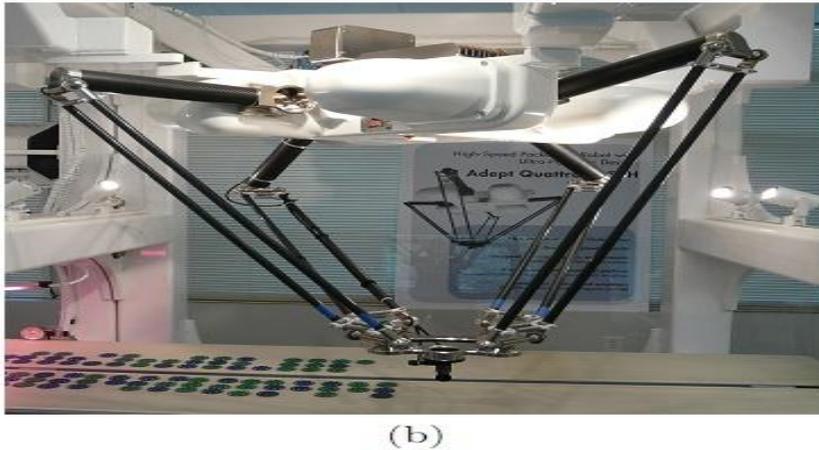


Figure I. 15. Robot parallèle

1.9.3 Le robot cartésien et le robot SCARA:

De retour aux robots sériels, le robot illustré à la figure I.16 c est un robot cartésien alors que le robot de la figure I.16 d est un robot SCARA. Ces trois derniers robots sont tous à quatre ddl (trois translations et une rotation autour d'un axe vertical) et servent à déplacer rapidement des petits objets.



Figure I. 16. Le robot cartésien et le robot SCARA

1.9.4 Les robots redondants à sept ddl

Enfin, il existe aussi des robots à sept ddl (c.à.d. avec sept articulations motorisées) comme le robot illustré à la figure I.17 a, mais ils sont rarement utilisés. L'avantage d'un tel robot redondant est l'existence d'une infinité de possibilités pour atteindre une pose désirée, ce qui permet au robot de contourner des obstacles. Beaucoup plus souvent, on monte un robot à six articulations sur un guide linéaire (figure I.17 b) ou sur une table pivotante, ce qui résulte aussi en un système robotique redondant. Cependant, la raison principale n'est pas de contourner des obstacles mais d'augmenter l'espace de travail du robot (l'ensemble de poses que l'effecteur du robot peut atteindre).



Figure I. 17. Les robots redondants à sept ddl

I.10 Critère de choix d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

- La charge maximum transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).
- L'architecture de la structure mécanique articulée, le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, est accessible par l'outil du robot qui peut balayer l'outil, le volume dépend de la géométrie du robot, de la longueur des segments et du débattement des articulations.
- Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel) – défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien – et le point atteint et calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position, à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.

➤ La répétitivité d'un robot est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail. En général, la répétitivité < 0.1 mm.

➤ La vitesse de déplacement (vitesse maximum en élongation maximum), accélération.

➤ La masse du robot.

➤ Le coût du robot.

➤ La maintenance.

I.11 Domaines de la robotique

Les robots industriels peuvent être utilisés dans plusieurs domaines et peuvent accomplir différentes tâches.

Domaine de la production ;

- ✓ Automatisation de la production.
- ✓ Meilleure qualité.
- ✓ Adaptation au volume de production.
- ✓ Constance de la qualité.
- ✓ Flexibilité

Domaine de l'exploration ;

- ✓ Accès difficile (nettoyage, démantèlement).
- ✓ Milieu hostile (déminage...)

Domaine de divers services et médicale.

I.12 Avantages et Inconvénients

1.12.1 Avantages :

- la robotisation a permis de remplacer l'homme dans certains travaux difficiles, répétitifs ou pénibles. Par exemple sur les chaînes de montages dans le domaine de l'automobile
- la robotisation a permis de remplacer l'homme dans des environnements hostiles. Par exemple pour explorer les fonds marins ou dans l'espace

- la robotisation a apporté à l'homme une plus grande précision, notamment dans le domaine médical
- l'usage et l'entretien de robots sont souvent plus économiques pour les industriels que l'emploi d'ouvriers

1.12.2 Inconvénients :

- On ne peut pas confier même aux robots les plus perfectionnés des tâches qui demandent une prise de décision si celle-ci n'a pas été programmée par l'homme.
- Au niveau économique, les robots ont remplacé les postes de travail des ouvriers.

I.13 Conclusion

Nous nous sommes contentés dans ce chapitre à donner quelques définitions de termes concernant plus particulièrement les domaines de la modélisation et de la commande des robots ces définitions reviendront très souvent dans ce travail .

Chapitre II :
Actionneurs et capteurs
en robotique

II.1. Introduction :

Le système de commande est un système dynamique qui contient un dispositif de commande en tant que partie intégrante. Le but du contrôleur est de générer des signaux de commande, qui conduira le processus pour être contrôlé. Parmi les différents types et les niveaux de signaux sont présents dans un système de contrôle, la modification du signal (y compris le conditionnement du signal et la conversion du signal) est en effet joue un rôle crucial à tout système de contrôle.

Les ingénieurs de contrôle devraient être en mesure d'identifier ou de sélectionner des composants, en particulier les capteurs et actionneurs, pour un système de contrôle, le modéliser et analyser les différents composants et les systèmes globaux, et de choisir les valeurs des paramètres afin que le système peut effectuer certaines fonctions en conformité avec les spécifications.

II.2. Actionneurs

II.2.1. Définition :

Un actionneur est un objet qui transforme l'énergie qui lui est fournie en un phénomène Physique qui fournit une information, modifie le comportement ou l'état d'un système.

Il existe trois types d'actionneur :

- Actionneur électrique.
- actionneur pneumatique.
- actionneur hydraulique.

Le schéma fonctionnel d'un actionneur ainsi que les schémas des principaux actionneurs sont représentés dans la figure ci-dessous.

Les moteurs électriques, Les vérins pneumatiques ainsi que les éléments chauffants sont des exemples typiques d'actionneurs utilisés en automatisation industrielle[14].

II.2.2. Les différents actionneurs :

Le mouvement est imposé au robot par un ou plusieurs actionneurs par transformation d'une énergie source en énergie de base utilisée.

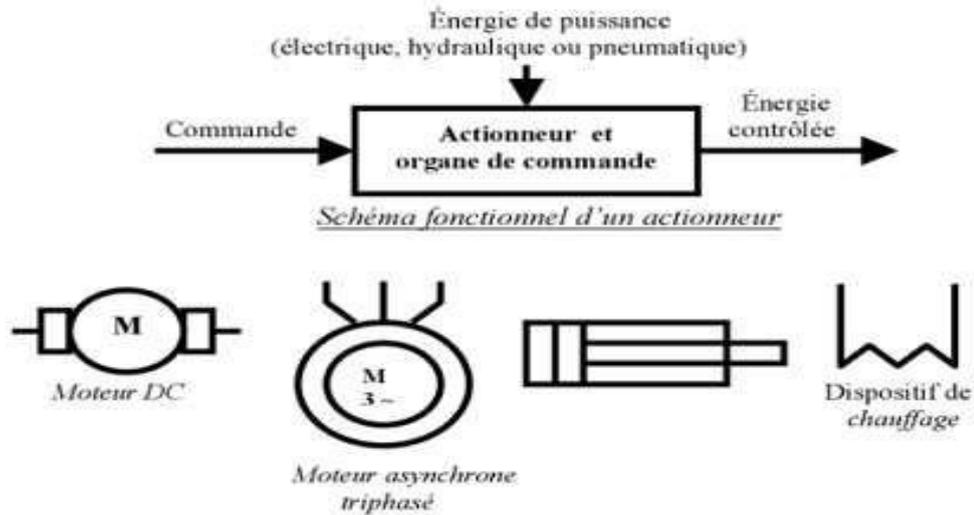


Figure II. 1. Schéma fonctionnel et symboles des actionneurs

II.2.2 Actionneur pneumatique :

Un vérin pneumatique est un actionneur linéaire dans lequel l'énergie de l'air comprimé est transformée en travail mécanique.

Cet actionneur de simplicité de mise en œuvre est utilisé dans toutes les industries manufacturières. Il permet de reproduire les actions manuelles d'un opérateur tel que pousser tirer, plier, serrer, etc...

Il existe différents types de vérins, les deux principaux sont :

Le vérin simple effet : qui peut développer son effort seulement dans un seul sens.

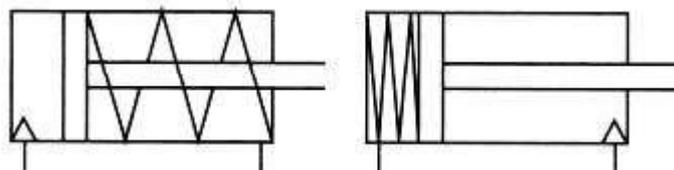


Figure II. 2. Vérin à simple effet .

Le vérin double effet : dont le travail se fait dans les deux sens.

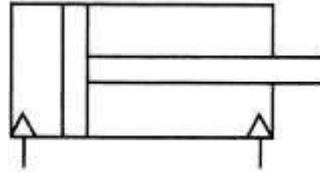
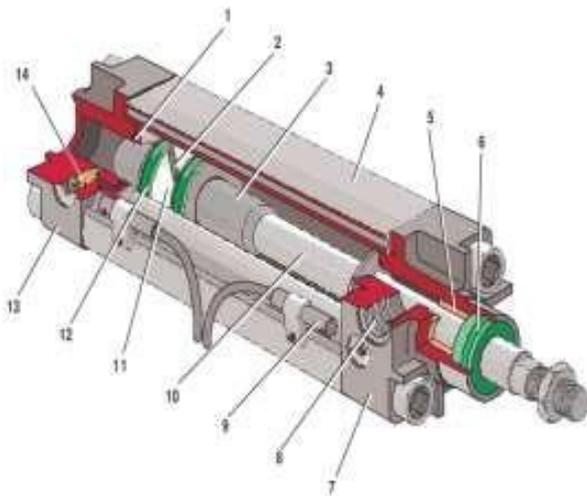


Figure II. 3. Vérin à double effet.



1 – joint	8 – orificed’admission
2 – aimant	9 – fin decourse
3 – amortissement	10 – tige de piston
4 – corps	11 – bague porteuse
5 – palier	12 – joint de position
6 – joint traqueur	13 – flasque (fond de vérin)
7 – flasque (nez de vérin)	14 – amortissement

Figure II. 4. Actionneur pneumatique.

II.2.2.1. Actionneur hydraulique :

Un actionneur hydraulique est composé de deux parties : une partie vérin et une partie valve. Dans un système à commande proportionnelle, on place dans l’étage de pilotage (valve) une bobine (solénoïde) qui régule la pression du fluide proportionnellement à la consigne électrique (courant tension) [15].



Figure II. 5. Actionneur hydraulique.

II.2.2.3 Actionneur électrique

II.2.2.3.1 Moteur à courant continu :

Un moteur électrique à courant continu (MCC) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d’énergie entre une

installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique. Il est très utilisé en industrie est nécessite une régulation précise de la vitesse de rotation. Ce chapitre traite la modélisation en vue de la simulation d'un moteur à courant continu à excitation séparée.[16]

II.2.2.3.2 Constitution :

Un inducteur appelé aussi stator ; l'inducteur est composé soit d'aimants permanents, soit d'enroulements bobinés autour d'un élément immobile du stator. Il crée le champ magnétique dit statorique.

Un induit appelé aussi rotor. Le rotor cylindrique est composé de tôles isolées entre elles et munies d'encoches dans lesquelles sont réparties les conducteurs. Parcours par un courant, ceux-ci créent le champ magnétique dit rotorique

Un collecteur fixé à l'induit, il est en contact avec les charbons.

Des charbons appelés aussi balais. Ils alimentent l'induit par le collecteur sur lequel ils frottent.

II.1.2.3.3 Structure de la machine à courant continu :

La figure II.7 montre la structure générale d'une machine à courant continu

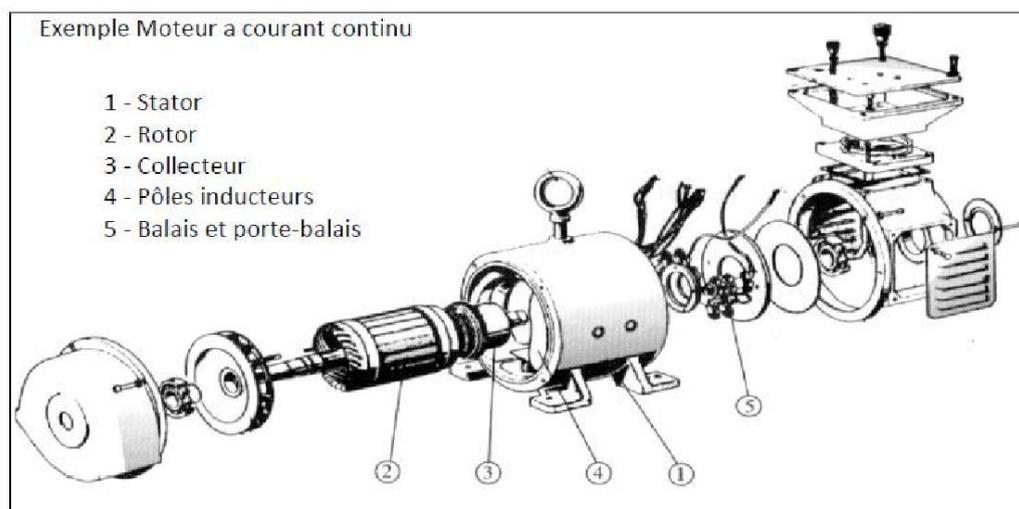


Figure II. 6. Structure générale d'une MCC.

A. Stator (Inducteur)

Il est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ appelé : champ inducteur (B_s). L'inducteur magnétise en créant un flux magnétique (Φ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques. Il est constitué principalement, de quatre (4) parties (Voir figure II.8) :

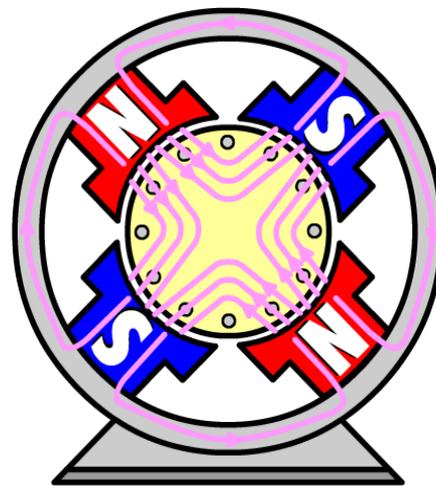
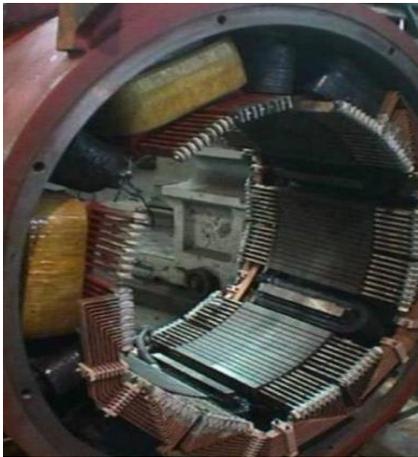


Figure II. 7. Composition de stator

B. Rotor (Induit)

C'est la partie mobile de la machine, porte les conducteurs soumis au flux magnétique de l'inducteur. Il est constitué de tôle en fer au silicium isolé entre elles pour limiter les pertes par hystérésis, les pertes par courants de Foucault. Le fer de l'induit comporte des encoches à la périphérie et dans ces encoches qu'est logé le bobinage de l'induit parcouru par un courant continu. Le bobinage de l'induit est formé de sections. Une section est un groupe de spires isolées essentielles. Les extrémités du bobinage de l'induit sont reliées au Collecteur.



Figure II. 8. Composition de l'induit.

A. Collecteur :

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit.

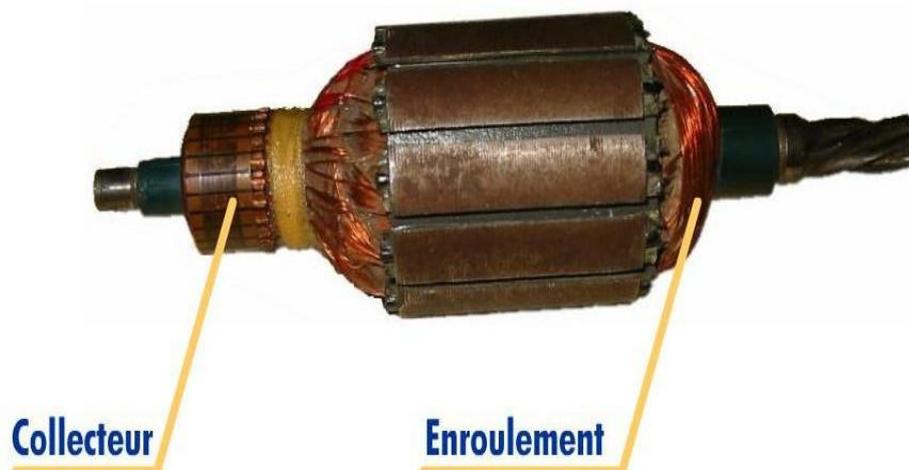


Figure II. 9. Collecteur

B. Balais :

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm² à quelques cm², en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisations évers

(courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches). Ils sont équipés d'une tresse de raccordement et maintenus en place par un porte-balais solidaire du stator. Un ressort exerce une pression constante sur la partie en graphite quel que soit le degré d'usure du balai et frottent sur le collecteur grâce à des ressorts.



Figure II. 10. Balais et porte balais

II.1.2.3.4 Principe de fonctionnement :

L'inducteur ou le stator crée un champ magnétique fixe B . ce stator peut être a<aimant permanent> ou constitué (comme sur le schéma) d'électro-aimant.

L'induit ou le rotor porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumise à des force (force dite de <Laplace>), entraînent la rotation du rotor.

Il en résulte une variation du flux du champ magnétique a traves chaque spire ; elle engendre une f.e.m qui <redressé>par l'ensemble{collecteur-balai}.

La valeur moyenne E de cette f.e.m est proportionnelle a la vitesse angulaire de rotation ω du rotor, au flux maximale du champ magnétique crée par l'inducteur à travers une spire ($\Phi = B \times S$) et une constant K qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, nombre de paires de pôles...)[17]

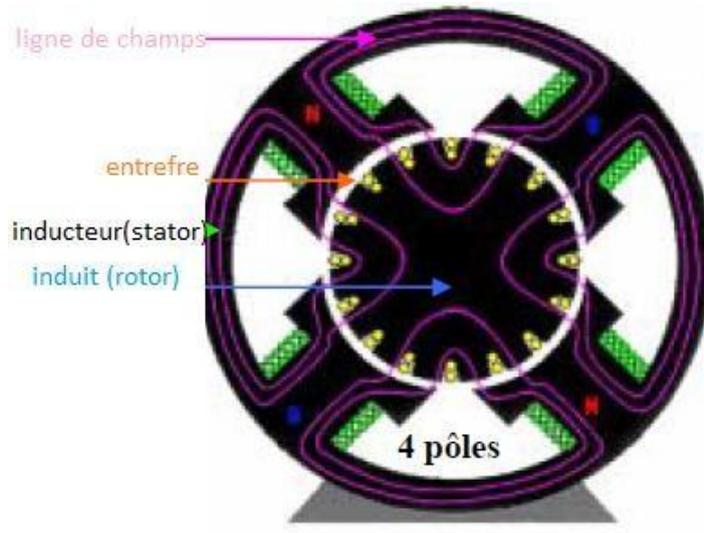


Figure II. 11.Principe de fonctionnement de MCC

II.1.2.3.5 Circulation de flux magnétique :

Le flux sort du pôle nord (N), s'épanouit un peu dans l'entrefer, traverse l'induit et entre dans le pôle sud (S). Il retourne au pôle nord (N) par les deux culasses, donc est égal à la moitié du flux sous un pôle. La perpendiculaire à l'axe des pôles est appelée ligne neutre.

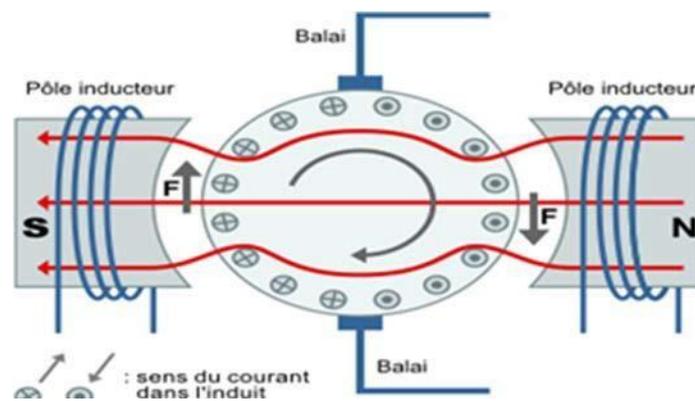


Figure II. 12.Distribution de flux

Dans l'entrefer, les épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, l'entrefer est plus large sous les cornes polaires. Les lignes de force y sont moins serrées et l'induction décroît quand on va de l'axe vers les extrémités. Elle est nulle sur la

ligne neutre. L'épanouissement polaire est donc le siège de courant de Foucault, c'est pourquoi il est quelque fois feuilleté.

II.1.2.3.6 Mise en équation du moteur à courant continu à Aimant Permanent :

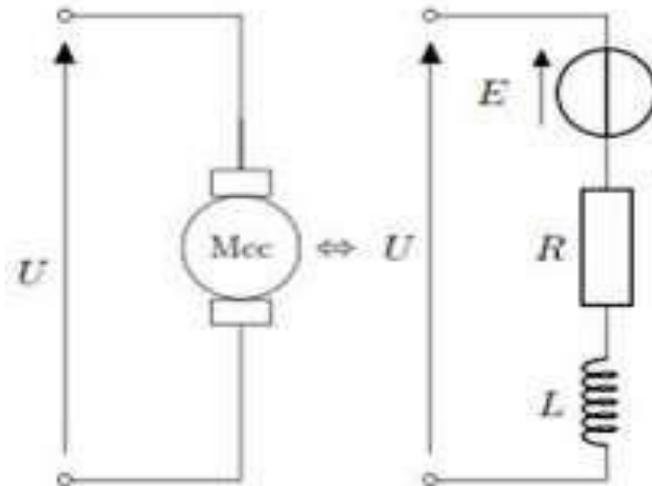


Figure II. 13.Schéma équivalent du MCC

L'équation électrique, liant la tension $U(t)$ aux bornes de l'induit (rotor) et le courant d'induit $I(t)$ s'écrit :

$$U(t) = RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + e(t) \quad (2.1)$$

D'où R est la résistance de l'induit du MCC, L son inductance et $e(t)$ la force électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor :

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (2.2)$$

Où K_e est la constante électromagnétique (en Vs/rad) caractéristique du moteur, donnée par le constructeur.

L'équation mécanique rendant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = C(t) - C_r(t) - F\omega(t) \quad (2.3)$$

Où $C(t)$ est le couple moteur, $C_r(t)$ est le couple résistant (charge et perturbations), F le

coefficient de frottement visqueux et J le moment d'inertie du rotor. Par construction, le couple (t) exercé par le stator sur le rotor est proportionnel au courant $I(t)$ qui alimente le moteur :

$$C(t) = K_c I(t) \quad (2.4)$$

En l'absence de perte : $K_e = K_c$

➤ Comportement global :

Le comportement global d'un moteur à courant continu peut s'exprimer sous la forme suivante via la transformée de Laplace :

$$U(t) = RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + e(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} U(p) = (R + Lp)I(p) + E(p)$$

$$e(t) = K_e \omega(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} E(p) = K_e \Omega(p) \quad (2.5)$$

$$C(t) = K_c I(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} C(p) = K_c I(p)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = C(t) - C_r(t) - F \omega(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} Jp\Omega(p) = C(p) - C_r(p) - F\Omega(p)$$

➤ Fonction de transfert :

La fonction de transfert d'un moteur à courant continu est donnée par :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K}{(R + Lp)(F + Jp) + K_e^2} \quad (2.6)$$

➤ Schémas bloc :

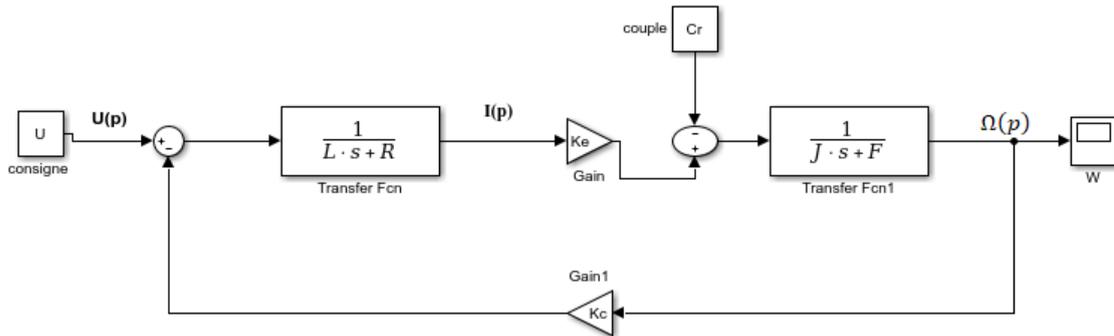


Figure II. 14. Schéma bloc d'un MCC.

II.2 Les capteurs

II.2.1 Définition :

Un capteur est un dispositif transformant une grandeur physique à une autre grandeur utilisable, tel qu'une tension électrique ou une intensité ; On fait souvent la confusion entre capteur et transducteur : le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

Le capteur est souvent le premier dispositif de la chaîne d'acquisition, il s'agit d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable.

CAPTEUR DE PRESSION

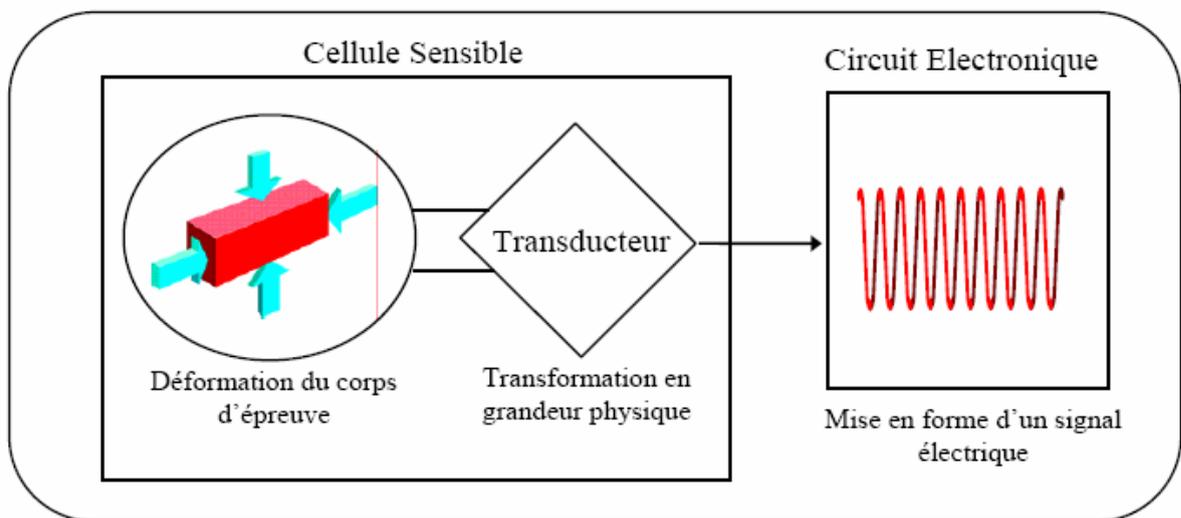


Figure II. 15. Schéma synoptique d'un capteur de pression.

II.2.2 Principales fonctions des capteurs :

Dans le cas d'un robot, on aura donc :

II.2.2.1 Les capteurs internes : un « état interne » (celui de la machine indépendamment de l'extérieur) qui va comporter deux séries de caractéristiques :

— L'état interne « classique » défini par les positions et les vitesses relatives des différents corps (qui peut s'agrandir ou être remplacé, suivant le besoin, par les couples ou forces aux articulations, et qui peut aussi prendre en compte avec le même formalisme les élasticités, frottements, etc.) ;

— L'état interne lié au besoin : sûreté de fonctionnement et maintenance : les paramètres à surveiller peuvent être divers : température des moteurs, pressions de fluide, usure de pièces, tensions électriques, grandeurs informatiques etc. [17]

II.2.2.2 Les capteurs externes : celui de l'environnement du robot qui fera appel.

Comme pour l'état interne :

- à des caractéristiques géométriques et cinématiques des corps présents ;
- à des caractéristiques liées à la sûreté de fonctionnement et à la maintenance,

Mais de plus :

- à des paramètres permettent au robot de « comprendre » l'environnement en termes d'exécution de la tâche désiré.
- Et à des grandeurs liées à la sécurité des personnes pouvant interagir avec le robot.[18]

	Fonction	Capteurs de	
Capteurs internes	(*) contrôle de poursuite de trajectoires référencée robot	Position (Orientation) Vitesse	couple force accélération
	Sûreté de fonctionnement		
		Température, pression, force, tension, courant, accélération, etc.	
	(*) localisation (contrôle de poursuite de trajectoires par rapport à l'environnement)	Position couple Orientation force distance accél.	Classes de capteurs
	Forces exercées par l'environnement	Force, accél., couple...	
	Compréhension de l'environnement	Les capteurs dépendent de la tâche (vision, toucher, etc.)	

Capteurs externes	Sûreté de fonctionnement de systèmes de l'environnement	Température, pression, etc (comme capteurs internes)	3) A distance (analyse globale)
	Sécurité des personnes	Contact, proximité distance, etc	

Tableau II. Principales fonctions des capteurs. () concerne les fonctions de base impérativement présentes sur tout robot asservi.[18]*

II.2.3 Les type de capteurs :

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories :

-Capteurs actifs.

- Capteurs passifs.

II.2.3.1 Les Capteurs actifs :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie à la grandeur physique à prélever : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. [19]

II.2.3.2 Les capteurs passifs :

Ils ont besoin dans la plupart des cas d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner. Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié engendre une variation de l'impédance. Il faut leur appliquer une tension pour obtenir un signal de sortie. [19]

II.2.4 Les familles des capteurs :

Les capteurs sont des composants d'automatisme qui ont pour but de récolter une information sur la partie opérative et de la retransmettre à la partie commande qui pourra ainsi la traiter, et on trouve trois familles essentielles :

II.2.4.1 Capteur TOR (tout ou rien) :

Les capteurs Tout ou Rien (TOR) délivrent une information binaire à la partie commande : l'information adopte l'état 0 ou l'état 1. Chaque état possède une signification dans le contexte du système.

On distingue essentiellement les capteurs de type mécanique et ceux de proximité (cellules, inductifs ou capacitifs).

Ils sont constitués :

- d'un élément sensible mécanique ou électrique.
- d'un ou plusieurs contacts de type normalement fermé ou de type normalement ouvert. [19]

II.2.4.2 Capteurs analogiques :

La sortie est une grandeur électrique dont la valeur est une fonction de la grandeur physique mesurée par le capteur. La sortie peut prendre une infinité de valeurs continues. Le signal des capteurs analogiques peut être du type :

- sortie tension ;
- sortie courante ;
- règle graduée, cadran, jauge (avec une aiguille ou un fluide) ; [19]

II.2.4.3 Capteurs numérique :

La sortie est une séquence d'états logiques qui, en se suivant, forment un nombre. La sortie peut prendre une infinité de valeurs discrètes. Le signal des capteurs numériques peut être du type :

- train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise ;
- code numérique binaire ;
- bus de terrain ; [19]

II .4 Relation capteurs actionneurs :

Les capteurs sont des informateurs traducteurs, ils détectent une variation de l'environnement de la partie opérative et la traduit en une information interprétable (grandeur électrique) par la partie commande afin de contrôler les actionneurs qui transforme une forme d'énergie en une autre pour but d'obtenir l'énergie souhaité (énergie mécanique). Comme le montre la figure ci-dessous.

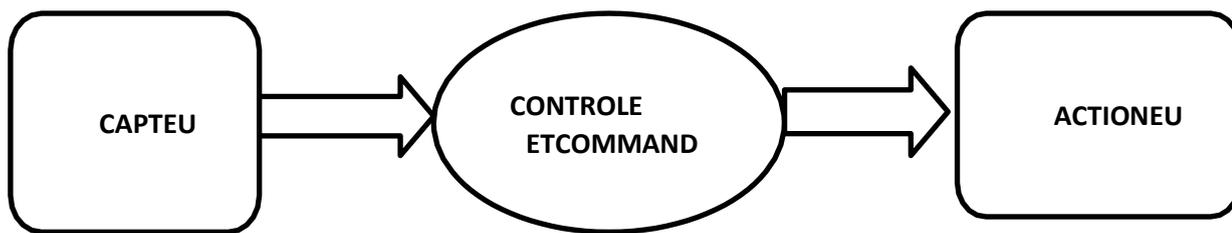


Figure 2.16: Relation capteurs actionneurs.

II.6. L'encodeur :

Un encodeur est un dispositif électromécanique qui génère un signal électrique en fonction de la position ou du déplacement de l'élément mesuré. En robotique, un encodeur permet d'obtenir une information en quasi-temps réel sur la position et vitesse du moteur et donc d'appliquer des corrections (on parle de boucle de contrôle) si le comportement du moteur n'est pas conforme à l'ordre qu'on lui a transmis[20].

II.5.1. Les différents types des encodeurs :

- Encodeur optique : Les encodeurs optiques fonctionnent à l'aide d'une roue codeuse et d'un émetteur et récepteur optique. Les codeurs optiques permettent de donner des informations sur la position d'un mobile, sa vitesse. Ainsi, un encodeur optique (parfois aussi appelé roue codeuse optique) est un composant électromécanique qui peut prendre différentes formes, et qui dans bien des casres semble beau coup à un potentiomètre [21].

Mais contrairement à ce dernier, l'encodeur possède un axe dont le déplacement n'est limité ni vers la gauche ni vers la droite : il peut être tourné indéfiniment dans un sens comme dans l'autre, il n'y a pas débuté.

- Encodeur incrémental : Un encodeur incrémental génère un signal permettant de déterminer les entés la vitesse de rotation, Les systèmes de détection conventionnels (interrupteurs et détecteurs de position) ne fournissent que des informations de type TOR (tout ou rien). Ainsi, ils ne répondent que partiellement aux besoins d'information [22].
- Encodeur absolue : Un encodeur absolu génère une information absolue indiquant la position du capteur. Ce type d'encodeur permet de connaître la position d'un objet solidaire de l'axe. Il est constitué de segments opaques et

de segments transparents répartis en plusieurs cercles concentriques sur la roue de l'encodeur [23].

II.6. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté un aperçu général sur les actionneurs et les capteurs couramment utilisés dans les applications robotiques.

Chapitre III :

Modélisation en

robotique

III.1 Introduction :

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

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

III.2 Structure géométrique des robots :

Un robot manipulateur est une cinématique constituée de $n+1$ corps, possédant deux corps particuliers et des actionneurs. Le premier corps particulier, appelé base, est le socle du robot ; le second, appelé terminal, est le support d'un préhenseur ou d'un outil [Gorla et al. 1984]. Les n corps sont liés entre eux par des liaisons (articulations), suivant une structure de chaîne, ces liaisons sont de nature rotoïde R ou prismatiques P. Les corps et les liaisons du robot manipulateur sont numérotés de 0 à n dans un ordre croissant en partant du socle (voir figure 3.1).

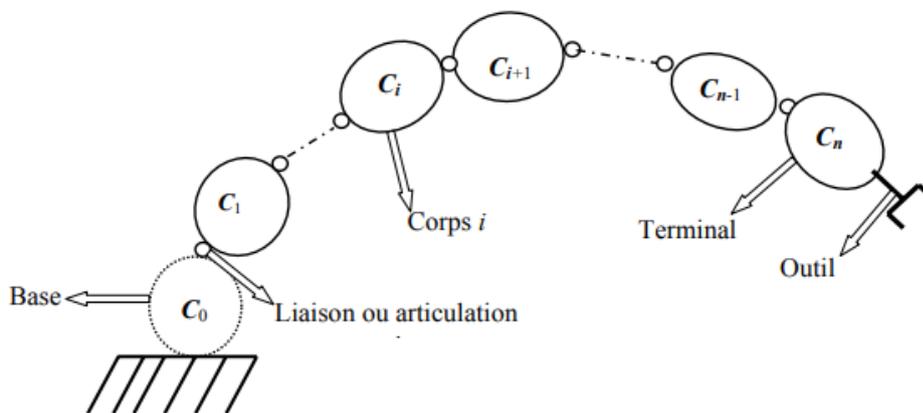


Figure III. 1 . Structure géométrique d'un robot à chaîne cinématique ouverte

III.3 Modèles géométriques :

III.3.1 Modélisation géométrique directe :

On peut dire que la modélisation géométrique directe est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal du robot en fonction de ses coordonnées articulaires(ou coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées généralisées), ces relations sont décrites par la fonction suivante :

$$X_i = F(q_i) \quad (3.1)$$

La situation de l'organe terminal est définie par 'n' coordonnées :

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (3.2)$$

Les variables articulaires sont définies par :

$$\theta_i = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T \quad (3.3)$$

Donc le modèle géométrique direct définit les coordonnées de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction des variables articulaires du robot (q_i). Ceci se fait en définissant un repère fixe généralement à la base du robot (R_0) et un autre au bout de l'organe terminal (R_n), et de calculer la matrice de passage entre R_0 et R_n en suivant les étapes décrites dans la section précédente.

a-Principe de Denavit Hatenberg :

Le passage de R_{j-1} à R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres suivants :

α_j : angle entre les axes Z_{j-1} et Z_j , correspondant à une rotation autour de X_{j-1} .

d_j : distance entre Z_{j-1} et Z_j , le long de X_{j-1} .

θ_j : angle entre les axes X_{j-1} et X_j , correspondant à une rotation autour de Z_{j-1} .

r_j : distance entre X_{j-1} et X_j , le long de Z_{j-1} .

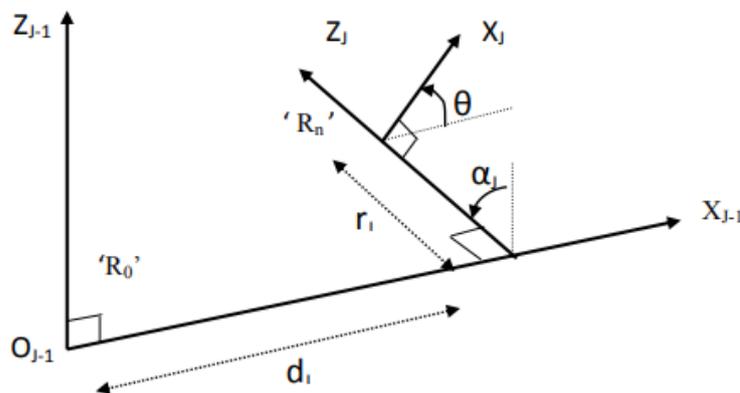


Figure III. 2. Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

La variable articulaire q_j associée à la $j^{\text{ème}}$ articulation est θ_j

La matrice de transformation homogène définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = Rot(x, \alpha_j) TRANS(x, d_j) Rot(Z, \theta_j) TRANS(z, r_j) \quad (3.4)$$

Avec *Rot* : rotation et *Trans* : translation

$$Rot(x, \alpha_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(Z, \theta_j) = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & 0 \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$TRANS(x, d_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$TRANS(z, r_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Alors :

$${}^{j-1}_j T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & d_j \\ \cos \alpha_j \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\sin \alpha_j & -r_j \sin \alpha_j \\ \sin \theta_j \sin \alpha_j & \cos \theta_j \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & r_j \cos \alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

III.3.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du robot cartésien de 2ddl

La figure ci-dessous est la représentation géométrique du robot cartésien de 2ddl :

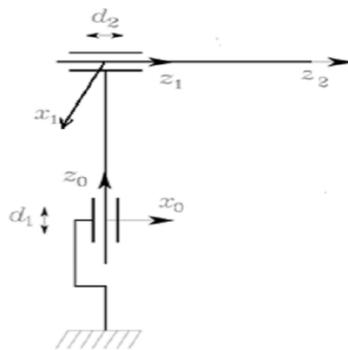


Figure III. 3.Schéma descriptif du robot cartésien 2ddl.

Ce qui donne le tableau des paramètres géométriques du robot

j/i	σ_i	α_i	a_i	θ_i	d_i

1	1	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	d_1
2	1	0	0	0	d_2

Tableau III. 1 paramètres de ' DENAVIT-HARTENBERG 'pour cartésien de 2DDL

Et les matrices homogènes de transformations de repères ${}^{i-1}T_i$:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Après la multiplication des matrices des transformations élémentaires, nous obtenons la matrice finale (0T_2) qui exprime le modèle géométrique direct.

$${}^0T_2 = {}^0T_1 {}^1T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

III.3.2 Modélisation géométrique inverse :

Elle consiste à calculer les variables articulaires en fonction des coordonnées opérationnelles qui spécifient la position de l'organe terminal ; c'est le modèle dont on a le plus besoin pour le déplacement de l'organe terminal.

Nous décrivons le modèle géométrique inverse par la fonction inverse du modèle géométrique direct :

$$X_i = f^{-1}(q_i) \quad (3.5)$$

III.3.2.1 Méthode de calcul du modèle géométrique inverse

Considérons la matrice de passage homogène qui a pour expression :

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n \quad (3.6)$$

On note :

$$U_0 = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \quad (3.7)$$

Et :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice U_0 est une donnée du problème : elle correspond à la situation désirée de l'organe terminal (Elle correspond à la matrice qui exprime le modèle géométrique direct).

Nous avons utilisé la méthode de Paul qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices ${}^jT_{j-1}$, pour j variant de 1 à $n-1$, opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche. Pour un robot à n degrés de liberté, on procède comme suit :

- La multiplication à gauche par 1T_0 , ce qui donne :

$${}^1T_0 U_0 = {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \quad (3.8)$$

Puisque chaque matrice ${}^{n-1}T_n$ est fonction des variables q_n , le terme de droite est fonction des variables q_2, \dots, q_{n-1}, q_n .

Terme déjà calculé lors de l'établissement du modèle géométrique direct. Le terme de gauche n'est fonction que des éléments de U_0 et du terme q_1 . $U_0 = {}^0T_n, q_1$ est alors obtenu par identification d'un ou de deux éléments, parmi les plus simples qui constituent l'expression de droite, avec les termes correspondant de gauche.

Partant de l'expression (3.8), on pré multiplie par 2T_1 et on réitère le même processus. La succession des équations permettant le calcul de tous les q_j est la suivante :

$$\begin{aligned}
 U_0 &= {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 {}^1T_0 U_0 &= {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 {}^2T_1 U_0 &= {}^2T_3 {}^3T_4 \dots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 {}^{n-2}T_{n-1} U_0 &= {}^{n-1}T_n
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

$$\left. \begin{array}{l} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right\} \tag{3.10}$$

Avec $U_j = {}^jT_{j-1} U_{j-1}$

Après ces étapes on parvient à trouver des expressions relativement complexes reliant les variables articulaires aux coordonnées désirées, cependant l'utilisation de la méthode de Paul sur un grand nombre d'exemples de robots industriels a permis de constater que les principaux types rencontrés sont peu nombreux, Trouver ces équations et leurs solutions ne veut pas dire résoudre, car d'après la configuration finale de l'organe terminal on se trouve confronté à 3 cas :

1. Absence de solutions lorsque la position se trouve en dehors de l'espace de travail du robot.
2. Une infinité de solutions.
3. Un nombre fini de solutions. C'est dans ce dernier cas que le robot est dit résoluble

III.4. Modélisation cinématique

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

III.4.1 Modèle cinématique directe (MCD)

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

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \tag{3.11}$$

$J(q)$ désigne la matrice jacobéenne de dimension $(m \times n)$ du robot. Le calcul de la matrice jacobéenne se fait en dérivant le système (3.1)

$$J(q) = [J_{ij}]_{i=\overline{1,m}; j=\overline{1,n}}$$

Avec

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j}$$

Dans notre cas :

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

Ce qui donne le MCD suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin(\vartheta_1) - l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & -l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ l_1 \cos(\vartheta_1) + l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

III.4.2 Modèle cinématique inverse (MCI) :

Le but de ce modèle consiste à trouver les vitesses articulaires qui génèrent la vitesse désirée du point terminal.

Sa détermination consiste à inverser la matrice Jacobéenne, qui n'est pas toujours possible. Le modèle cinématique inverse est de la forme :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)X \quad (3.13)$$

III.5 Modélisation dynamique :

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

Dans la modélisation dynamique on constate deux modèles :

III.5.1 Le modèle dynamique direct :

Le modèle dynamique est la relation entre les couples et/ou forces appliqués aux actionnaires et les positions, vitesses et accélérations. Le modèle dynamique est présenté par une relation de la forme :

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (3.14)$$

Γ : Vecteurs des couples/forces des actionnaires, selon que l'articulation est rotoïde ou Γ prismatique (dans la suite en écrira tout simplement couple).

q : Vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : Vecteur des vitesses articulaires.

\ddot{q} : Vecteur des accélérations articulaires.

f_e : Vecteur représentant les efforts extérieur (fores et moment) qu'exerce le manipulateur sur l'environnement.

III.5.2 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations. Le modèle dynamique inverse est représenté par une relation de la forme :

$$\Gamma = (\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (3.15)$$

Γ : Vecteur des couple/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique.

θ : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\theta}$: Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{\theta}$: Vecteur des accélérations articulaire.

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

Le formalisme de Lagrange-Euler : cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en simulation

Le formalisme de Newton-Euler: cette méthode est mieux adaptée pour le calcul du modèle dynamique que l'on utilise en commande.

Nous allons voir dans ce qui suit la modélisation d'un robot manipulateur dynamique rigide, à deux degrés de liberté et en tenant compte des effets de la vitesse, on va utiliser le formalisme de Lagrange pour déterminer les équations du mouvement.

III.5.3 Formulation de Lagrange-Euler

Pour obtenir le modèle dynamique avec le formalisme de Lagrange-Euler, nous devons tout d'abord déterminer l'énergie cinétique $K(q, \dot{q})$ et l'énergie potentielle $U(q)$ parce que le Lagrangien est défini comme suit :

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.16)$$

En utilisant le lagrangien pour les équations de mouvement du robot manipulateur sont données par :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (3.17)$$

Où q et $\dot{q} \in R^n$ sont respectivement les coordonnées et les vitesses généralisées, $\tau \in R^n$ vecteur des couples généralisés.

III.5.4 L'énergie cinétique

Etant donné un point du corps "i" avec le vecteur de coordonnées ${}^i r$ par rapport au repère associé au corps considéré, les coordonnées de ce point dans le repère R_0 s'écrivent :

$$r = {}^0 T_i {}^i r \quad (3.18)$$

Avec ${}^0 T_i = {}^0 T_1 {}^1 T_2 \dots {}^{i-1} T_i$ une transformation homogène $\in R^{4 \times 4}$ qui est une fonction des variables articulaires q_1, q_2, \dots, q_i par conséquent, dans le repère R_0 est donné par l'expression :

$$v = \frac{dr}{dt} = \sum_i^{j-1} \left\{ \frac{\partial {}^0 T_i}{\partial q_i} \dot{q} \right\} {}^i r \quad (3.19)$$

Puisque $\frac{\partial {}^0 T_i}{\partial q_i} = 0$ pour $j > i$, nous pouvons remplacer la limite supérieure de la sommation par "n" qui est le nombre d'articulations.

L'énergie cinétique d'une masse infinitésimale dm à ${}^i r$ ayant une vitesse :

$v = [v_x v_y v_z]^T$ est :

$$dk_i = \frac{1}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dm = \frac{1}{2}(v^T v) dm \quad (3.20. a)$$

En utilisant l'expression de la vitesse "v" donnée par l'équation (3.19), nous obtenons :

$$dk_i = \frac{1}{2} \left\{ \sum_j^n \sum_k^n \left(\frac{\partial {}^0 T_i}{\partial q_i} \right) ({}^i r \quad {}^i r^T dm) \frac{\partial {}^0 T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right\} \quad (3.20. b)$$

L'énergie cinétique du corps et donnée par :

$$K_i = \int dK_i \quad (3.21)$$

En substituant dk_i par l'expression (3.20.b), nous pouvons déplacer le symbole d'intégration à l'intérieur des sommations. Alors, la matrice pseudo-inertie $\in R^{n \times n}$ pour le corps "i" est donnée par :

$$I_i = \int {}^i r \quad {}^i r^T dm \quad (3.22)$$

L'énergie cinétique du corps "i" peut s'écrire :

$$K_i = \frac{1}{2} \text{trace} \left\{ \sum_j^n \sum_k^n \left(\frac{\partial {}^0 T_i}{\partial q_i} \right) I_i \frac{\partial {}^0 T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right\} \quad (3.23)$$

Trouvons la matrice pseudo-inertie avant de déterminer l'énergie cinétique totale.

Soit ${}^i r = [x \ y \ z \ 1]$, les coordonnées dans le repère R_i de la masse infinitésimale dm .

Alors, le développement de la relation (3.22) donne :

$$I_i = \begin{bmatrix} \int x^2 dm & \int yx dm & \int zx dm & \int x dm \\ \int xy dm & \int y^2 dm & \int zy dm & \int y dm \\ \int xz dm & \int yz dm & \int z^2 dm & \int z dm \\ \int x dm & \int y dm & \int z dm & \int dm \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Où les intégrales sont prises sur le volume du corps "i". C'est une matrice constante qui est évaluée une fois pour chaque corps. Elle dépend de la géométrie et la distribution de la masse du corps "i". En effet, elle est exprimée en termes des moments d'inertie du corps "i" :

$$I_{xx} = \int (y^2 + z^2) dm$$

$$I_{yy} = \int (x^2 + z^2) dm \quad (3.25)$$

$$I_{zz} = \int (x^2 + y^2) dm$$

Produit vectoriel de l'inertie :

$$I_{xy} = \int xy dm$$

$$I_{xz} = \int xz dm \quad (3.26)$$

$$I_{yz} = \int yz dm$$

Et des moments premiers :

$$m\bar{x} = \int x dm$$

$$m\bar{y} = \int y dm \quad (3.27)$$

$$m\bar{z} = \int z dm$$

Avec "m" est la masse totale du corps "i" et ${}^i\bar{r} = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z} \ 1]^T$ représente le vecteur des Cordonnées de centre de gravité du corps "i" dans le repère R_i , nous pouvons écrire :

$$I_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & m\bar{x} \\ I_{xy} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & m\bar{y} \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & m\bar{z} \\ m\bar{x} & m\bar{y} & m\bar{z} & m \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Ces grandeurs sont soit données par les spécifications du constructeur, soit peuvent calculées à partir des autres grandeurs.

L'énergie cinétique du bras manipulateur est

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{trace} \left\{ \sum_j^n \sum_k^n \left(\frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_i} \right) I_i \frac{\partial {}^0T_i^T}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right\} \quad (3.29. a)$$

Puisque la trace d'une somme des matrices est la somme des traces individuelles, nous pouvons inter changer les sommations et l'opérateur de la trace pour obtenir :

$$k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n m_{jk} (q) \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (3.29. b)$$

Où

$$k = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3.29. c)$$

Où la matrice d'inertie du bras $M(q) \in R^{n \times n}$ a les éléments génériques définis comme suit :

$$m_{jk} (q) = \sum_{i=1}^n \text{trace} \left\{ \left(\frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_i} \right) I_i \frac{\partial {}^0T_i^T}{\partial q_k} \right\} \quad (3.30. a)$$

Et \dot{q} est le vecteur de vitesses articulaires $\in R^n$

Puisque $\frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_i} = 0$ pour $j > i$, nous pouvons écrire :

$$m_{jk} (q) = \sum_{i=\max(j,k)}^n \text{trace} \left\{ \left(\frac{\partial {}^0T_i}{\partial q_i} \right) I_i \frac{\partial {}^0T_i^T}{\partial q_k} \right\} \quad (3.30. b)$$

L'équation (II.32.c) fournit une expression de l'énergie cinétique du bras en fonction des grandeurs connues et des variables articulaires q_i . Puisque $m_{jk} = m_{kj}$, la matrice d'inertie $M(q)$ est symétrique. L'énergie cinétique est toujours positive, elle s'annule seulement lorsque les vitesses généralisées \dot{q} deviennent nulles, donc la matrice d'inertie $M(q)$ est aussi définie positive.

III.5.5 L'énergie potentielle

Si le corps i a une masse m_i est un centre de gravité ${}^i\bar{r}$ exprimé dans les coordonnées du repère R_i l'énergie potentielle du corps est donnée par :

$$U_i = -m_i {}^0g^T {}^0T_i {}^i\bar{r} \quad (3.31)$$

Où ${}^0g^T$ est le vecteur de gravité exprimé avec les coordonnées de repère de base R_0 ainsi :

$$g^T = [g_x g_y g_z]$$

L'énergie potentielle totale du bras est alors :

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = - \sum_{i=1}^n m_i {}^0g^T {}^0T_i {}^i\bar{r} \quad (3.32)$$

Puisque seule 0T_i est fonction de q alors U est fonction seulement de q .

III.5.6 Les équations de mouvement du robot

En utilisant l'expression (3.30.c) de l'énergie cinétique qui est fonction de q et \dot{q} et l'expression (3.32) de l'énergie potentielle qui est fonction seulement de q , les équations de Lagrange s'écrivent :

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad (3.33)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} \sum_i^n m_{ik}(q) \dot{q}_i + \frac{1}{2} \sum_j^n m_{ik}(q) \dot{q}_j \right\}$$

$$= \frac{d}{dt} \left\{ \sum_j^n m_{kj}(q) \dot{q}_j \right\}$$

$$= \sum_j^n m_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j}^n \frac{d m_{kj}(q)}{dt} \dot{q}_j$$

$$= \sum_j^n m_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j}^n \frac{d m_{kj}(q)}{dq_i} \dot{q}_i \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial K}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n \frac{d m_{ij}(q)}{dq_k} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.35)$$

Donc les équations de Lagrange peuvent s'écrire :

$$\tau_k = \sum_j^n m_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j}^n \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j + \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad (3.36)$$

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots, n$

En inter changeant les ordres de sommation et profitant de l'avantage de symétrie de $M(q)$, nous pouvons démontrer que :

$$\sum_{i,j}^n \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.37)$$

Donc

$$\sum_{i,j}^n \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j = \sum_{i,j}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (3.38)$$

Les termes

$$C_{ij,k} = \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right\} \quad (3.39)$$

Sont appelés symboles de Christoffel. Nous remarquons que, pour un k donné, nous avons

$C_{ij,k} = C_{j,i,k}$. Finalement, nous avons les termes :

$$G_k = \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad (3.40)$$

Alors nous pouvons écrire les équations de Lagrange ainsi :

$$\tau_k = \sum_j^n m_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j}^n C_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + G_k(q) \quad (3.41)$$

Dans l'équation ci-dessus, il y a trois types de termes. Les premiers comportent la dérivée seconde des coordonnées généralisées. Les seconds peuvent être classifiés en deux types, des termes concernant un produit de type \dot{q}_i^2 sont appelés centrifuges, par contre, les termes concernant un produit de type $q_i q_j$, où $i \neq j$, sont appelés des termes de Coriolis. Les troisième type de terme

et fonction seulement de q qui est issu de la dérivation de l'énergie potentielle et qui est appelé vecteur des forces de gravité. Il est habituel d'écrire (3.41) sous la forme matricielle suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (3.42)$$

Où

τ : Vecteur des couples appliqués aux articulations $\in R^n$;

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

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

q : Vecteur des positions articulaires $\in R^n$;

$M(q)$: Matrice d'inertie $\in R^{n \times n}$;

$G(q)$: Vecteur de forces de gravité $\in R^n$;

$C(q, \dot{q})$: Matrice des forces centrifuges et de Coriolis $\in R^{n \times n}$ dont les éléments sont :

$$C_{kj} = C_{ikj}(q)\dot{q}_i$$

$$C_{kj} = \sum_i^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \quad (3.43)$$

Si en tenant compte des frottements qui sont difficiles à modéliser. Pourtant, ils sont loin d'être négligeables sur les robots réels et aussi les efforts extérieurs exercés par et sur l'organe terminal dans et par l'environnement ; donc le modèle (3.42) peut être généralisé sous la forme suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q}) + \tau d \quad (3.44)$$

Nous avons ajouté un terme de frottement de la forme :

$$f(\dot{q}) = Fv + \dot{q} + fs \quad (3.45)$$

Avec $Fv \in R^{n \times n}$ est la matrice de coefficient du frottement visqueux et $fs \in R^n$ un terme de frottement sec ; ainsi qu'un terme τd de perturbations ou bien des couples résistants.

- Examinons les propriétés de chaque terme du modèle dynamique de l'équation (3.44) et des autres propriétés qui auront une grande importance lors de la conception des lois de commandes.

III.6 Les propriétés des équations dynamiques d'un robot manipulateur

III.6.1 Propriétés de la matrice d'inertie

Comme nous avons vu $M(q)$ est symétrique et définie positive. En effet ; l'énergie cinétique du bras est :

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$$

Une autre propriété essentielle de $M(q)$ est qu'elle est bornée ; c'est-à-dire :

$$\lambda_{min} In \leq M(q) \leq \lambda_{max} In \quad (3.46)$$

Avec λ_{min} et λ_{max} sont des valeurs propres (scalaires) minimale et maximale strictement positives de $M(q)$ pour toutes les configurations de q .

En plus, la matrice d'inertie inverse est bornée :

$$\frac{1}{\lambda_{min}} In \leq M^{-1}(q) \leq \frac{1}{\lambda_{max}} In \quad (3.47)$$

Si l'articulation est rotoïde ; les limites λ_{min} et λ_{max} sont constantes puisque q apparaît dans $M(q)$ seulement à travers des termes de \sin et \cos , qui sont bornés par 1. Par contre; si le bras a des articulations prismatiques, alors λ_{min} et λ_{max} peuvent être des fonctions scalaires de q .

III.6.2 Propriétés de la matrice des forces centrifuges et de Coriolis

La matrice des forces centrifuges et de Coriolis est caractérisée par les trois propriétés suivantes :

❖ Propriété 1: la matrice définie par :

$$N(q, \dot{q}) = \dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}) \quad (3.48)$$

Est antisymétrique c'est-à-dire que les termes de $N(q, \dot{q})$ vérifient $q^T N(q, \dot{q}) q = 0$ et que :

$$n_{jk} = -n_{kj}$$

$$n_{ij} = \dot{m}_{kj}(q) - 2C_{kj,i}(q)\dot{q}_k$$

$$n_{ij} = \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_k} - 2C_{kj,i}(q)\dot{q}_k \quad (3.49)$$

En remplaçant l'expression donnée par l'équation, nous obtenons :

$$n_{ij} = \left\{ \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} - \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} - \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{jk}(q)}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_k$$

$$= \left\{ \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{jk}(q)}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_k \quad (3.50)$$

En profitant de la symétrie de la matrice d'inertie $M(q)$ nous pouvons écrire aussi :

$$n_{ij} = \left\{ \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{jk}(q)}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_k = - \left\{ \frac{\partial m_{ik}(q)}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_k$$

$$n_{ij} = -n_{ji} \quad (3.51)$$

On peut donner une interprétation énergétique à cette propriété, en utilisant le principe de la conservation de l'énergie. Nous pouvons remarquer que la dynamique du robot manipulateur peut s'écrire en termes de la matrice antisymétrique $N(q, \dot{q})$ ainsi :

$$M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2} \{ \dot{M}(q) - N(q, \dot{q}) \} \dot{q} = \tau - g(q) \quad (3.52)$$

Tel que les vecteurs de perturbations et frottements sont ignorés, ou K représente l'énergie cinétique :

$$\frac{dK}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\dot{q}^T M(q) \dot{q})$$

$$= \frac{1}{2} \ddot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \ddot{q}$$

$$= \ddot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} \quad (3.53)$$

• Ceci est le principe de la conservation de l'énergie, avec $\dot{q}^T N(q, \dot{q}) \dot{q}$ est un terme nul car les forces centrifuges et de Coriolis ne travaillent pas, $\dot{q}^T \tau$ désigne la puissance mécanique fournie par les actionneurs et $\dot{q}^T g(q)$ est la puissance des actions de pesanteurs.

❖ Propriété 2 : la matrice $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ vérifie la relation suivante :

$$C(q, x)y = C(q, y)x \text{ pour tous } x, y \in R^n \quad (3.54)$$

x, y deux vecteurs de dimension $(n \times 1)$

❖ Propriété 3 : la relation suivante est vérifiée :

$$\|C(q, x)\| \leq C_0 \|x\| \forall x \in R^n \quad (3.55)$$

Pour une certaine constante bornée $C_0 > 0$

III.6.3 Propriétés du vecteur de gravité

Dans le cas d'un robot possédant seulement des articulations rotoïdes ; la variable articulaire apparaît dans $g(q)$ seulement à travers des fonctions sinus et cosinus. Par conséquent ; nous pouvons avoir la majoration suivante :

$$\|g(q)\| < g_0 \quad (3.56)$$

Pour une certaine constante bornée $g_0 > 0$.

III.6.4 Propriétés du vecteur des frottements

Le vecteur des frottements exprimé par la relation (3.45) est composé de frottements visqueux et de frottements secs. Supposant que le frottement sur chaque articulation dépend seulement de la vitesse de l'articulation considérée.

Nous avons alors pour $i = 1, \dots, n$:

$$F_v = \text{diag}(\dot{q}_i) \quad \text{et} \quad f_s = [k_1 \text{sgn}(\dot{q}_1) \dots k_i \text{sgn}(\dot{q}_i) \dots k_n \text{sgn}(\dot{q}_n)] \quad (3.57)$$

Avec k_i sont des coefficients connus et la fonction sgn est définie par :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x > 0 \\ \text{indéterminée} & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Une majoration des vecteurs de frottements peut être considérée de la forme :

$$\|F_v \dot{q} + f_s(\dot{q})\| \leq F_{1,M} + F_{2,M} \|\dot{q}\| \quad (3.58)$$

Avec $F_{1,M}$, et $F_{2,M}$, données pour un bras spécifique.

III.5.5 Propriétés du vecteur des perturbations

Le modèle dynamique possède un vecteur de perturbation qui représente les incertitudes du modèle dynamique et les perturbations externes. Nous considérons qu'il est borné tel que :

$$\|\tau d\| \leq T_0 \quad (3.59)$$

Où T_0 est une constante scalaire qui peut être calculée pour un bras donnée.

➤ **Modélisation dynamique d'un robot cartésien à 2d.d.l :**

Considérez le manipulateur représenté à la figure composé de deux liaisons et de deux articulations prismatiques

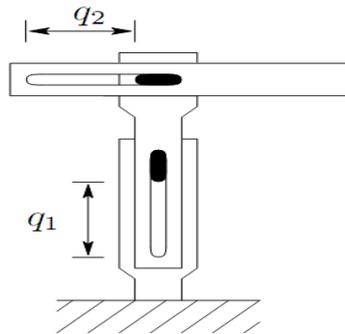


Figure III. 4. robot cartésien 2ddl

Les masses des deux maillons sont notées respectivement par m_1 et m_2 , et le déplacement de ces deux joints prismatiques par q_1 et q_2 respectivement est noté. On voit alors aisément, que ces deux grandeurs servent de coordonnées généralisées au manipulateur. Les coordonnées généralisées ayant des dimensions de distance, les forces généralisées correspondantes ont des unités de force. En fait, ce sont juste les forces appliquées à chaque articulation.

Appelons-les f_i , $i = 1, 2$.

Puisque nous utilisons des variables articulaires comme coordonnées généralisées, on sait que l'énergie cinétique est de forme (3.29.c) et que l'énergie potentielle n'est qu'une fonction de q_1 et q_2 , de sorte que nous pouvons utiliser les formules de la section II pour obtenir les équations dynamiques. De plus, les deux articulations étant prismatiques, la vitesse angulaire jacobienne est nulle et l'énergie cinétique de chaque maillon est uniquement constituée par le terme de translation. Il s'ensuit que la vitesse du centre de masse de la biellette 1 est donnée par :

$$\dot{X}_1 = J_1(q)\dot{q}$$

Où :

$$J_1(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix}$$

De même

$$\dot{X}_2 = J_2(q)\dot{q}$$

Où

$$J_2(q) = \begin{bmatrix} 00 \\ 01 \\ 10 \end{bmatrix}$$

L'énergie cinétique est donc donnée par

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \{m_1 J_1^T(q) J_1(q) + m_2 J_2^T(q) J_2(q)\}$$

Par rapport à (3.23), on voit que la matrice d'inertie D est donnée simplement par

$$M(q) = \begin{pmatrix} m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$$

Ensuite, l'énergie potentielle de la liaison 1 est $m_1 g q_1$, tandis que celle de la liaison 2 est $m_2 g q_2$, où g est l'accélération due à la gravité.

L'énergie potentielle globale est donc

$$U = g(m_1 + m_2)q_1$$

Nous sommes maintenant prêts à écrire les équations du mouvement.

Comme la matrice d'inertie est constante, tous les symboles de Christoffel sont nuls et par conséquent la matrice Coriolis.

En outre, les vecteurs sont donnés par :

$$\frac{\partial U}{\partial q_1} = g(m_1 + m_2), \frac{\partial U}{\partial q_2} = 0$$

La substitution de (3.44) donne les équations dynamiques comme suit :

$$(m_1 + m_2)\ddot{q}_1 + g(m_1 + m_2) = f_1$$

$$m_2\ddot{q}_2 = f_2$$

III .7 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du robot manipulateur cartésien à 2ddl. Ainsi, nous avons présenté les différentes structures et les modèles. Le modèle géométrique permet d'établir la relation entre les coordonnées opérationnelles et les coordonnées généralisées, tandis

que le modèle cinématique établit la relation entre les variations de ces grandeurs. Le formalisme d'Euler-Lagrange a été adopté afin d'élaborer le modèle dynamique du robot qui servira dans le chapitre prochain à élaborer des lois de commandes de ce robot.

Chapitre IV :

Commandes et simulations

IV.1 Introduction

Nous allons développer et appliqué à notre robot manipulateur cartésien à 2ddl une commande linéaire simple et efficace largement utilisée pour ce genre de robot, nous allons appliquer deux stratégies différentes, la régulation et la poursuite, chacune possède son importance dans divers applications industrielles, médicale ou autres.

IV.2 Commande en régulation proportionnel dérivée avec compensation de gravité

IV.2.1 Application de la commande sur le robot cartésien 2ddl

➤ 1^{er} joint q_1 :

La loi de commande d'un correcteur PD avec compensation de gravité en régulation est donné par :

$$F_1 = K_{p1}(q_1^d - q_1) - K_{v1}\dot{q}_1 + g(m_1 + m_2) \quad (4.1)$$

Soit l'équation de la dynamique du 1^{er} joint considérée à partir du modèle dynamique du robot :

$$m_1 \ddot{q}_1 = -g(m_1 + m_2) + F_1 \quad (4.2)$$

En remplaçant l'équation (4.1) dans (4.2), on obtient la dynamique du 1^{er} joint en boucle fermée.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{q}_1 &= -g(m_1 + m_2) + K_{p1}(q_1^d - q_1) - K_{v1}\dot{q}_1 + g(m_1 + m_2) \\ m_1 \ddot{q}_1 &= K_{p1}(q_1^d - q_1) - K_{v1}\dot{q}_1 \end{aligned}$$

En utilisant la transformée de Laplace de cette dernière équation nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée en régulation du 1^{er} joint.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{q}_1 &= K_{p1}q_1^d - K_{p1}q_1 - K_{v1}\dot{q}_1 \xrightarrow{TL} m_1 s^2 Q_1 + K_{v1}s Q_1 + K_{p1} Q_1 = K_{p1} Q_1^d \\ (m_1 s^2 + K_{v1}s + K_{p1}) Q_1 &= K_{p1} Q_1^d \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{K_{p1}}{m_1 s^2 + K_{v1}s + K_{p1}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

En écrivant la fonction de transfert en boucle fermée sous sa forme canonique du second ordre, nous pourrions calculer les gains K_{p1} et K_{v1} par identifications en imposant un certain cahier de charge pour la dynamique de régulation désirée en boucle fermée du 1^{er} joint.

Cahier de charge du 1^{er} joint : afin d'éviter le phénomène de résonance ainsi qu'un dépassement dans la réponse de la position le coefficient d'amortissement doit être choisit plus grand que 0,7.

Pour ne pas solliciter l'actionneur de ce joint qui est le plus lourd et le plus déterminant dans la dynamique du robot en général et sachant qu'elle est influente sur la rapidité de la réponse alors on choisira une pulsation naturelle en boucle fermée inférieure à 3rad/s.

On choisira les valeurs suivantes : $\omega_n = 2,582 \text{ rad / s}$ et $\xi = 0.9$

$$\frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{K_{p1}}{m_1 s^2 + K_{v1} s + K_{p1}} = \frac{K_{p1} / m_1}{s^2 + (K_{v1} / m_1) s + (K_{p1} / m_1)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

Par identification des deux membres l'équation (4.4) nous avons :

$$\begin{cases} K_{p1} / m_1 = \omega_n^2 \\ K_{v1} / m_1 = 2\xi\omega_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{p1} = m_1 \omega_n^2 = 100 \\ K_{v1} = 2\xi\omega_n m_1 = 69,72 \end{cases}$$

➤ 2^{ème} joint :

La loi de commande d'un correcteur PD en régulation est donnée par :

$$F_2 = K_{p2} (q_2^d - q_2) - K_{v2} \dot{q}_2 \quad (4.5)$$

Soit l'équation de la dynamique du 2^{ème} joint considérée à partir du modèle dynamique du robot :

$$m_2 \ddot{q}_2 = F_2 \quad (4.6)$$

En remplaçant l'équation (4.6) dans (4.5), on obtient la dynamique du 2^{ème} joint en boucle fermée.

$$m_2 \ddot{q}_2 = K_{p2} (q_2^d - q_2) - K_{v2} \dot{q}_2$$

En utilisant la transformée de Laplace de cette dernière équation nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée en régulation du 2^{ème} joint.

$$\begin{aligned}
 m_2 \ddot{q}_2 &= K_{p2} q_2^d - K_{p2} q_2 - K_{v2} \dot{q}_2 \xrightarrow{TL} m_2 s^2 Q_2 + K_{v2} s Q_2 + K_{p2} Q_2 = K_{p2} Q_2^d \\
 (m_2 s^2 + K_{v2} s + K_{p2}) Q_2 &= K_{p2} Q_2^d \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_2^d} = \frac{K_{p2}}{m_2 s^2 + K_{v2} s + K_{p2}}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

En écrivant la fonction de transfert en boucle fermée sous sa forme canonique du second ordre, nous pourrions calculer les gains K_{p2} et K_{v2} par identifications en imposant un certain cahier de charge pour la dynamique de régulation désirée en boucle fermée du 2^{ème} joint.

Cahier de charge du 2^{ème} joint : afin d'éviter le phénomène de résonance ainsi qu'un dépassement dans la réponse de la position le coefficient d'amortissement doit être choisit plus grand que ou égale à 0,7.

Pour assurer une certaine rapidité de la réponse sans trop solliciter l'actionneur de ce joint nous choisirons une pulsation naturelle en boucle fermée inférieure à 3rad/s.

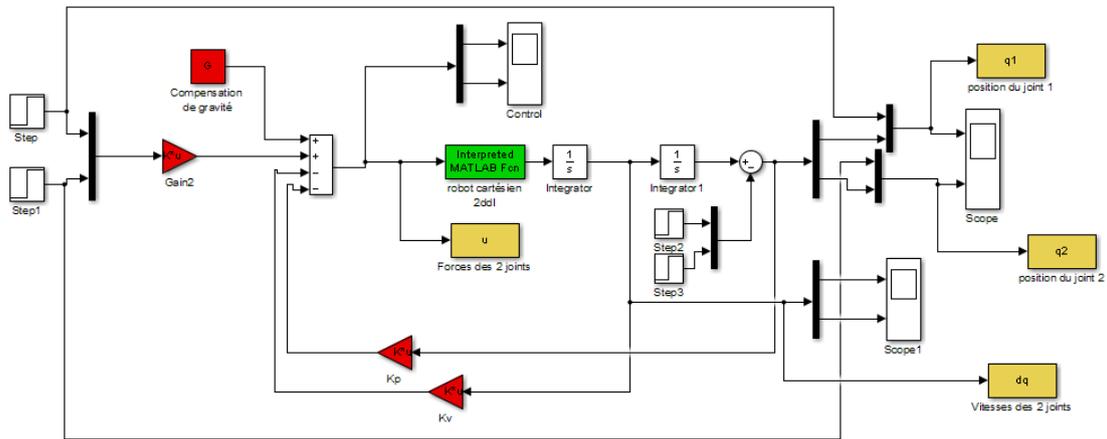
On choisira les valeurs suivantes : $\omega_n = 2,645 \text{ rad / s}$ et $\xi = 0.7$

$$\frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{K_{p1}}{m_1 s^2 + K_{v1} s + K_{p1}} = \frac{K_{p1} / m_1}{s^2 + (K_{v1} / m_1) s + (K_{p1} / m_1)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{4.8}$$

Par identification des deux membres l'équation (4.8) nous avons :

$$\begin{cases} K_{p2} / m_2 = \omega_n^2 \\ K_{v2} / m_2 = 2\xi\omega_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{p2} = m_2 \omega_n^2 = 70 \\ K_{v2} = 2\xi\omega_n m_2 = 37 \end{cases}$$

IV.2.2 Schéma de simulation de la commande en régulation



IV.3 Résultats et commentaires

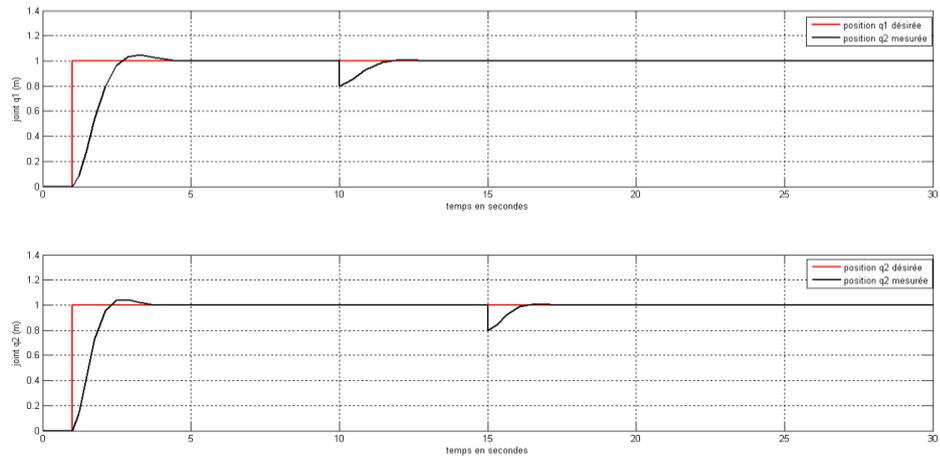


Figure IV. 1. Réponse en position des joints 1 et 2

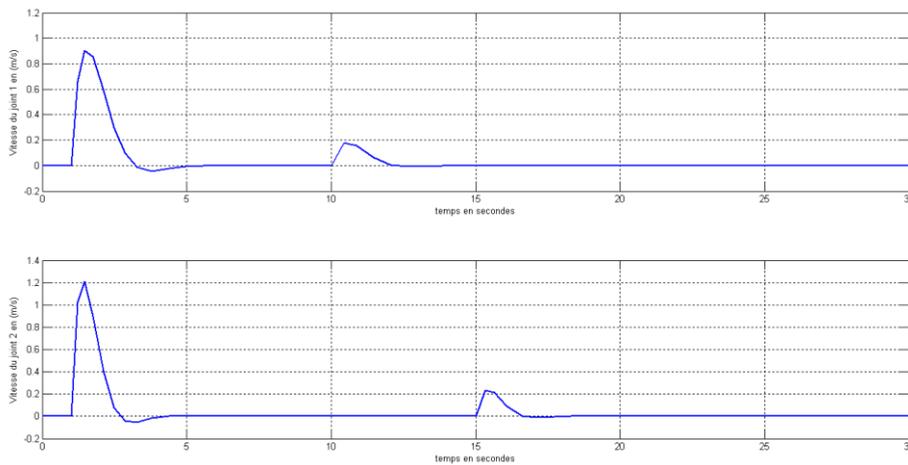


Figure IV. 2. signaux des vitesses pour les deux joints.

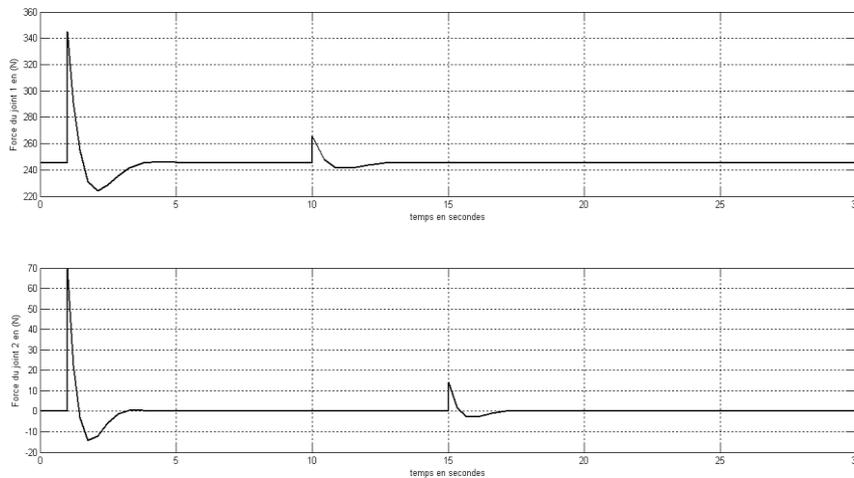


Figure IV. 3. signaux de commandes pour les deux joints.

Les résultats obtenus par la figure 4.1 montrent un temps de réponse assez rapide d'une seconde pour le 1^{er} joint et de moins pour le 2^{ème} avec un dépassement inférieur à 5% pour les deux réponses en position, la même dynamique est constatée pour le rejet de perturbation, la figure 4.2 présentent les deux vitesses de déplacement linéaires compatibles avec la dynamique en boucle fermée et enfin la figure 4.3 montre les signaux de commandes délivrés aux deux actionneurs des deux joints, on remarque nettement la forte sollicitation du 1^{er} actionneur par rapport au 2^{ème} et c'est normal vu la masse du 1^{er} bras qui est plus grande que celle du 2^{ème}.

IV.4 Commande en poursuite proportionnel dérivée sans compensation de gravité

Application de la commande sur le robot cartésien 2ddl

Les trajectoires générées pour ce schéma de commande sont des polynômes quintiques qui offrent des profils optimaux en position, vitesse et accélération.

➤ 1^{er} joint q_1 :

La loi de commande d'un correcteur PD en poursuite est donné par :

$$F_1 = \ddot{q}_1^d + K_{p1} (q_1^d - q_1) - K_{v1} \left(\dot{q}_1^d - \dot{q}_1 \right) \quad (4.9)$$

Soit l'équation de la dynamique du 1^{er} joint considérée à partir du modèle dynamique du robot :

$$m_1 \ddot{q}_1 = -g(m_1 + m_2) + F_1 \quad (4.10)$$

En remplaçant l'équation (4.9) dans (4.10), on obtient la dynamique du 1^{er} joint en boucle fermée.

$$m_1 \ddot{q}_1 = -g(m_1 + m_2) + \ddot{q}_1^d + K_{p1}(q_1^d - q_1) + K_{v1}(\dot{q}_1^d - \dot{q}_1)$$

En utilisant la transformée de Laplace de cette dernière équation et en omettant le terme de gravitation qui est considéré comme une perturbation, nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée en poursuite du 1^{er} joint.

$$m_1 \ddot{q}_1 = \ddot{q}_1^d + K_{p1}q_1^d + K_{v1}\dot{q}_1^d - K_{p1}q_1 - K_{v1}\dot{q}_1 \xrightarrow{TL} m_1 s^2 Q_1 + K_{v1} s Q_1 + K_{p1} Q_1 = s^2 Q_1^d + K_{v1} s Q_1^d + K_{p1} Q_1^d$$

$$(m_1 s^2 + K_{v1} s + K_{p1}) Q_1 = (s^2 + K_{v1} s + K_{p1}) Q_1^d \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{s^2 + K_{v1} s + K_{p1}}{m_1 s^2 + K_{v1} s + K_{p1}} \quad (4.11)$$

En écrivant la fonction de transfert en boucle fermée sous sa forme canonique du second ordre, nous pourrions calculer les gains K_{p1} et K_{v1} par identifications en imposant un certain cahier de charge pour la dynamique de poursuite désirée en boucle fermée du 1^{er} joint.

Cahier de charge du 1^{er} joint : Le problème de la poursuite est différent de celui de la régulation, car la fonction de transfert en boucle fermée de la poursuite introduit en plus des pôles, des zéros et c'est à ceux-là que revient le dernier mot en poursuite, il revient donc d'imposer des zéros réels bien placés pour assurer une bonne poursuite avec une erreur nulle.

En examinant la fonction de transfert en boucle fermée de la poursuite nous constatons qu'un zéro sera égal à un pôle, alors nous profitons de la simplification de ce pôle/zéro par choisir un zéro à partie réel négative très loin de l'origine du plan complexe pour assurer une bonne poursuite et un zéro aussi à partie réel négative proche de l'axe imaginaire qui va compenser un pôle lent afin d'assurer une dynamique d'annulation de l'erreur de poursuite assez rapide.

On choisira les valeurs suivantes : $z_1 = -10^5 \text{ rad} / \text{s}$ et $z_2 = -1 \text{ rad} / \text{s}$

$$\frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{s^2 + K_{v1} s + K_{p1}}{m_1 s^2 + K_{v1} s + K_{p1}} = \frac{(s^2 + K_{v1} s + K_{p1}) / m_1}{s^2 + (K_{v1} / m_1) s + K_{p1} / m_1} = \frac{k(s - z_1)(s - z_2)}{(s - p_1)(s - p_2)} \quad (4.12)$$

$$\frac{Q_1}{Q_1^d} = \frac{(s^2 + K_{v1} s + K_{p1}) / m_1}{s^2 + (K_{v1} / m_1) s + K_{p1} / m_1} = \frac{(0,06667 s^2 + 6667 s + 6667)}{s^2 + 6667 s + 6667}$$

Par identification des deux membres l'équation (4.12) nous avons :

$$\begin{cases} K_{p1} = \frac{6667}{0,06667} = 10^5 \\ K_{v1} = \frac{6667}{0,06667} = 10^5 \end{cases}$$

➤ 2^{ème} joint :

La loi de commande d'un correcteur PD en poursuite est donnée par :

$$F_2 = \ddot{q}_2 + K_{p2} (q_2^d - q_2) - K_{v2} \left(\dot{q}_2^d - \dot{q}_2 \right) \quad (4.13)$$

Soit l'équation de la dynamique du 1^{er} joint considérée à partir du modèle dynamique du robot :

$$m_2 \ddot{q}_2 = F_2 \quad (4.14)$$

En remplaçant l'équation (4.13) dans (4.14), on obtient la dynamique du 2^{ème} joint en boucle fermée.

$$m_2 \ddot{q}_2 = \ddot{q}_2 + K_{p2} (q_2^d - q_2) + K_{v2} \left(\dot{q}_2^d - \dot{q}_2 \right)$$

En utilisant la transformée de Laplace de cette dernière équation, nous obtenons la fonction de transfert en boucle fermée en poursuite du 2^{ème} joint.

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{q}_2 = \ddot{q}_2 + K_{p2} q_2^d + K_{v2} \dot{q}_2^d - K_{p2} q_2 - K_{v2} \dot{q}_2 \xrightarrow{TL} m_2 s^2 Q_2 + K_{v2} s Q_2 + K_{p2} Q_2 = s^2 Q_2^d + K_{v1} s Q_1^d + K_{p1} Q_1^d \\ (m_2 s^2 + K_{v2} s + K_{p2}) Q_2 = (s^2 + K_{v2} s + K_{p2}) Q_2^d \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_2^d} = \frac{s^2 + K_{v2} s + K_{p2}}{m_2 s^2 + K_{v2} s + K_{p2}} \end{aligned} \quad (4.15)$$

En écrivant la fonction de transfert en boucle fermée sous sa forme canonique du second ordre, nous pourrions calculer les gains K_{p2} et K_{v2} par identifications en imposant un certain cahier de charge pour la dynamique de poursuite désirée en boucle fermée du 2^{ème} joint.

Cahier de charge du 2^{ème} joint : la même analyse déjà développée pour le 1^{er} joint est valable pour le 2^{ème} joint néanmoins le zéro qui doit assurer la poursuite doit être choisit moins grand que pour la 1^{er} joint à cause de la légèreté de ce dernier par rapport au 1^{er} car un zéro aussi

grand généra des oscillations dans la commande avec une forte sollicitation de l'actionneur de ce 2^{ème} joint.

On choisira les valeurs suivantes : $z_1 = -10^3 \text{ rad} / \text{s}$ et $z_2 = -1 \text{ rad} / \text{s}$

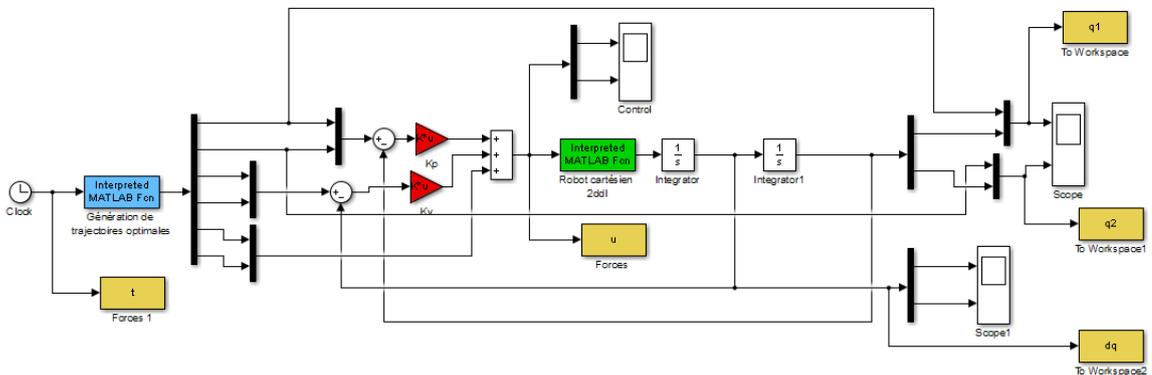
$$\frac{Q_2}{Q_2^d} = \frac{s^2 + K_{v2}s + K_{p2}}{m_2s^2 + K_{v2}s + K_{p2}} = \frac{(s^2 + K_{v2}s + K_{p2})/m_2}{s^2 + (K_{v2}/m_2)s + K_{p2}/m_2} = \frac{k(s-z_1)(s-z_2)}{(s-p_1)(s-p_2)} \quad (4.16)$$

$$\frac{Q_2}{Q_2^d} = \frac{(s^2 + K_{v2}s + K_{p2})/m_2}{s^2 + (K_{v2}/m_2)s + K_{p2}/m_2} = \frac{(0,1s^2 + 100s + 100)}{s^2 + 100s + 100}$$

Par identification des deux membres l'équation (4.16) nous avons :

$$\begin{cases} K_{p2} = 100 / 0,1 = 10^3 \\ K_{v2} = 100 / 0,1 = 10^3 \end{cases}$$

2.2 Schéma de simulation de la commande en poursuite



a. Résultats et commentaires :

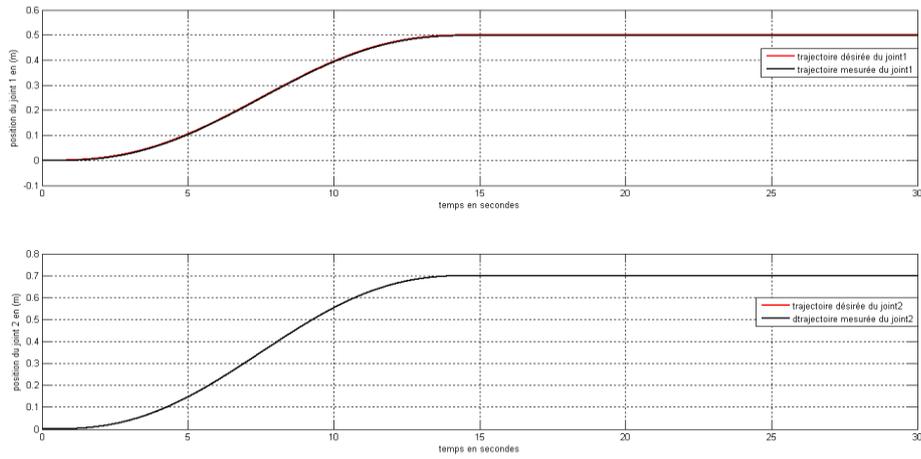


Figure IV. 4. réponse en position des joints 1 et 2.

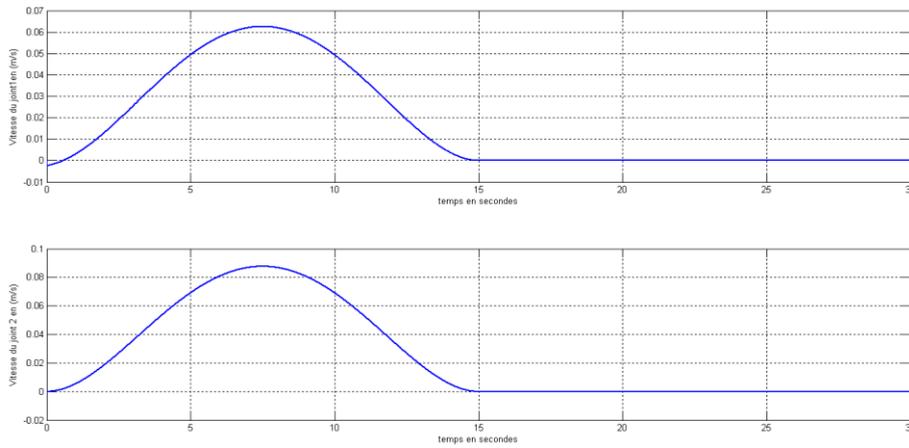


Figure IV. 5. signaux des vitesses pour les deux joints.

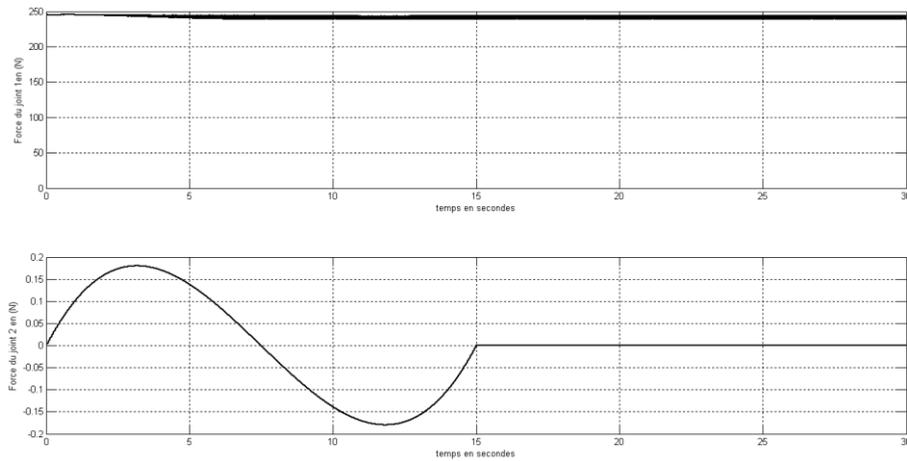


Figure IV. 6. signaux de commandes pour les deux joints.

Les résultats obtenus par la figure 4.4 montrent l'excellente poursuite des trajectoires désirées en position notamment pour le 2^{ème} joint, on arrive à peine distingué la trajectoire désirée de celle mesurée, la figure 4.5 présente les vitesses des deux joints, on remarque leurs faibles amplitudes vu la nature des trajectoires optimales désirées cela paraît logique et enfin la figure 4.6 montre les signaux de commande délivrés aux deux actionneurs, la forte sollicitation du 1^{er} montre que l'effort de la poursuite a été essentiellement porté par cet actionneur du 1^{er} joint cela est due qu'il est à la base du robot et c'est lui qui supporte tout le poids de ce dernier, nous rappelons qu'en poursuite nous n'avons pas compenser la gravité du robot, cela n'aurait pas induit à une grande diminution des signaux de commandes mais seulement à la diminution des oscillations remarquées sur le signal de commande du 1^{er} joint.

IV.5 Conclusion

D'après les résultats de simulations obtenus suite à l'application d'une commande très largement utilisée pour les robots manipulateurs qui est la commande proportionnelle dérivée PD avec compensations de gravité, que celle-ci est aussi efficace dans le cas d'un robot cartésien, que ça soit en régulation ou en poursuite, la dynamique peu complexe et linéaire de ce robot a plus facilité la tâche de la commande et a permis d'obtenir d'excellent résultats tant en régulation qu'en poursuite.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives :

Les robots manipulateurs représentent un champ d'application et de développement très actif actuellement et dans un avenir proche, avec l'adjonction de l'intelligence artificielle ils incarneront l'industrie 2.0 du présent et du futur, l'architecture cartésienne d'un robot manipulateur est aussi importante et intéressante que l'architecture rotoïde, malgré la simplicité de leur modèle dynamique qui par l'absence de la matrice Coriolis/centrifuge (pas de rotation) et des moments d'inerties dans leur matrice d'inertie, leur commande présente autant de challenge que pour les autres architectures de robots manipulateurs, l'effet de gravité ainsi que les frottements nécessitent une commande avancée robuste pour de très hauts performances à fonctionnement rapide. Les commandes classiques développées dans ce travail ont montré leur efficacité par la compensation de l'effet de la gravité en régulation et en poursuite, mais en ignorant les frottements et les incertitudes sur les valeurs des paramètres inertiels du robot.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons la prise en compte des frottements et des incertitudes sur les paramètres du robot, ainsi qu'un fonctionnement à grande vitesse, et pour cela des commandes avancées doivent être développées et testées sur un tel modèle dynamique plus réaliste du robot manipulateur cartésien.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Ignacio Herrera Aguilar. « Commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service », thèse doctorat, université Toulouse III ,2007.

[2] HAMDACHE Zine Eddine TOUIL Farid, #Réalisation et commande d'un bras robotique à quatre degrés de liberté {mémoire master université UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA 2019

[3] AIT DAHMANE Kahina et AIT ZIANE Meziane, « Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API », mémoire master, Université KHEMIS MILIANA (2015).

[4] BOUZIANE Fatima Zohra “Rétroconception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible” UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM Option Ingénierie des systèmes mécaniques productives, (2013)

[5] RICHA Brahim et BOUYEKHF Mohamed Redah, « Etude et réalisation d'un bras robot à 2DDL », mémoire master, Université KHEMIS MILIANA (2017).

[6] RICHARD M. Murray et ZEXIANG Li, «A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation», (1994).

[7] E. Dombre, « Analyse et Modélisation des Robots Manipulateurs », (22-01-2002).

[8] http://silanus.fr/sin/formationISN/Parcours/Robotique/co/module_Robotique_9.html

[9] zone industrie. Manipulateur pneumatique PARTNER EQUO PE pour arbres porte-bobines. [En ligne]. [Consulté le : 14 juillet 2017] Disponible sur : <https://www.zoneindustrie.com/Actualite/Manipulateur-pneumatique-PARTNER-EQUO-PE-pour-arbres-porte-bobines-15612.html>

[10] https://fr.123rf.com/photo_87756664_manipulateur-d-usine-main-automatique-tenir-la-boîte-en-carton-au-dessus-du-convoyeur-illustration-.html

[11] S. Ramzy et S. Nasser Eddine, “Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un PC”, mémoire de Master. Département de génie électrique 54 option micro-informatique et instrumentation. Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 2010.

[12] <http://www.linternaute.com/science/technologie/dossiers/06/0603-intelligence-artificielle/2.shtml>

[13] <https://philippejamet.pagesperso-orange.fr/prod/theme3/robot>

[14] .dondon.vvv.enseirb-matmeca.fr/RSIcapteur/a.pdf

[15].PierreLopez,AhmedSaïdNouri.'Théorieélémentaireetpratique

de lacommandeparlesrégimesglissants(ParPierre Lopez,Ahmed Saïd Nouri);Auteur: ISBN103-540-31003-7

[16] Prouvost Patrick,*Automatiquecontrôleetrégulation:courset exercices corrigés*,Dunod,2010

[17] Henri Bourlès, *Systèmes linéaires - De la modélisation à la commande*, Hermes Science Publishing, 2006, 510p.(ISBN 2746213001).

[18] Hermès, Paris, 1986, 1992, éditions Hermès, 34, rue Eugène Flachat, 75017 Paris, ISBN 2-86601-076-0 , 1 réédition(larobotiqueprincipesetapplications)

[19]:<https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur04/2016>

[20] http://www.alliantech.com/pdf/technique/Capteur_de_courant.pdf

[21] .<https://www.generationrobots.com/blog/fr/2014/01/encodeurs-robotique-mobile/>

[22].http://www.lesia.insatoulouse.fr/~acco/acco_wiki/lib/exe/fetch.php?media=hard:gsi:2010_11:le_codeur_incremental.pdf

[23] .<https://www.generationrobots.com/blog/fr/2014/01/encodeurs-robotique-mobile/>

