

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCINTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur

Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Génie Mécanique

Option : Mécatronique

THEME

**Etude, Réalisation, commande et diagnostic d'un robot
manipulateur**

Présenter par :

CHABANE Brahim

NETTARI Nouh

Promoteur : **Dr. TOUATI Youcef**

Année : 2017/2018

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à mes chers parents, "Ma mère" et " Mon père " qui ont éclairés mon chemin et qui m'ont encouragés et soutenus durant tous mes études.

A mes chers frères Hassane, Louanes, Mohamed, Ali et sa petite famille et ma chère sœur.

A mon binôme : NETTARI Nouh.

A tous mes amis et mes proches.

A tous mes camarades de groupe MMTR16.

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant mon travail et les moments difficiles.

Brahim

Dedicace

I have the great honor to dedicate this modest work as proof of respect, to my dear parents, to my family.

To my partner: CHABANE Brahim.

Nouh

Remerciement

Il est toujours délicat de remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à cet achèvement que représente l'aboutissement d'un travail de mémoire. Je vais pourtant essayer en demandant aux personnes qui seront oubliées ou omises de ne pas m'en tenir trop rigueur.

Tout d'abord louange et éloge au bon Dieu qui nous a guidés sur le droit chemin tout au long de notre travail, et qui nous a inspiré les bons pas et les bons réflexes. Sans sa miséricorde ce travail n'aura plus abouti.

*Toutes nos gratitudees à **Dr : TOUATI Youcef** qui nous a été attentif et qui nous a orientés avec ses conseils précieux.*

*Nos vifs remerciements à **Mr : ZABOUDJ Mustapha** et notre ami **BOUTECH Mouaadh** qui nous a aidés dans la réalisation de notre projet Sans oublier également de remercier **Mr : BENSNOUCI Hichem**.*

*Sans oublier également de remercier nos frères **NETTARI Yacine** et **CHABANE Ali** pour leurs financements de notre projet.*

Nos vifs remerciements aussi pour l'ensemble des membres de jury qui ont accepté d'analyser et d'examiner notre travail.

A tous ceux qui nous ont aidés et encouragé, de près ou de loin, pour la réalisation de notre présent travail, Nous disons tout simplement « Merci ».

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur les robots industriels

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition générale.....	2
I.2.1. La robotique	2
I.2.2. Le robot industriel	2
I.3. L'histoire de la robotique industrielle	2
I.4. Types de robots	3
I.4.1. Robots mobiles	3
I.4.2. Robots manipulateurs	4
I.5. Les éléments constitutifs d'un robot.....	4
I.5.1. Unité opérationnelle	5
I.5.2. Unité informationnelle	5
I.6. Structure mécanique articulée (SMA)	5
I.6.1. Structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple.....	5
I.6.2. Structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée	6
I.7. Architecture des robots	6
I.7.1. La base.....	7
I.7.2. Le porteur	7
I.7.3. L'actionneur	7
I.7.4. L'organe terminal (Effecteur)	8
I.8. Classification des robots	8
I.8.1. Classification fonctionnelle.....	8
I.8.2. Classification géométrique	9
I.9. Les actionneurs	11
I.9.1. Moteur pas à pas.....	11

I.9.2. Principe de fonctionnement.....	12
I.9.3.Moteur à courant continu	12
I.10. Les capteurs	13
I.10.1. Définition	13
I.10.2. Propriétés statiques.....	14
I.10.3. Propriétés dynamiques	14
I.10.4. Le potentiomètre	14
I.10.5. Le capteur photoélectrique	15
I.11. Carte de commande Arduino	15
I.11.1. Définition	16
I.11.2. Matériel arduino	16
I.11.2.1. Entrées / Sorties (I/O) numériques	16
I.11.2.2. Entrées / Sorties I/O analogique	17
I.11.2.3. Tensions de références.....	18
I.11.2. Langage de programmation.....	18
Conclusion.....	19

CHAPITRE II : Etude de l'art sur les méthodes de diagnostic

II.1. Introduction	20
II.2.Quelques définitions	20
II.3. Type de défauts.....	20
II.3.1. Défauts actionneurs.....	21
II.3.2. Défauts capteurs.....	21
II.3.3. Défauts systèmes ou composants.....	21
II.4. Méthodes de diagnostic	22
II.4.1. Méthodes de diagnostic à base des données	22
II.4.2. Méthodes de diagnostic à base de modèle	22
II.4.2.1. Méthodes basées sur les observateurs	23

II.4.2.2. Espace de parité.....	23
II.4.2.3. Méthodes par filtrage	23
II.4.2.4. Redondance physique et analytique	23
II.5. Comparaison entre les deux méthodes	24
Conclusion.....	24

CHAPITRE III : Modélisation, Commande et Diagnostic du robot

III.1. Modélisation 3D du robot	25
III.1.1. Présentation de logiciel SolidWorks.....	25
III.1.2.Création des composants	25
III.2.La modélisation géométrique	28
III.2.1.Le modèle géométrique direct	29
III.2.1.1.Méthode de Denavit-Hartenberg modifie	29
III.2.1.2.la méthode de projection	32
III.2.2.Le model géométrique inverse (MGI) :	33
III.3. Modélisation cinématique	35
III.3.1. modèle cinématique direct.....	35
III.3.2.modèle cinématique inverse	37
III.4. Le moment d’inertie	38
III. 4.1.Définition et principe.....	38
III.5. Commande de robot	42
III.5.1. Commande des moteurs des articulations	42
III.5.2. Commande de robot en boucle ouverte	43
III.6.1. Modèle Simulink du moteur pas à pas	45
III.7. diagnostic du robot.....	48
III.7.1. Redondance analytique.....	48
III.7.1.1. Relations de la redondance analytique.....	48
III.7.2. Visualisation des résultants	49

III.7.2.1. Cas de bon fonctionnement (sans défaut)	49
III.7.2.2. Cas de fonctionnement défaillant.....	50
Conclusion.....	56
Conclusion Générale	57

Liste Des Figures

Figure I.1. Robotique industrielle (Unimate, PUMA)	3
Figure I.2: Spirit, NASA, sur Mars	3
Figure I.3: Robot Kuka.....	4
Figure I.4. Structure fonctionnelle d'un robot.....	4
Figure I.5. Robot à chaîne ouverte simple	6
Figure I.6. Robot à chaîne fermée.	6
Figure I.7. Architecture d'un robot.	6
Figure I.8. Représentation d'une articulation rotoïde.....	7
Figure I.9. Représentation d'une articulation prismatique.	7
Figure I.10. Manipulateur à commande manuelle.....	8
Figure I.11. Manipulateur à cycle pré-réglé	8
Figure I.11. Manipulateur programmable	9
Figure I.12. Manipulateur intelligent	9
Figure I.13. Robot cartésien	10
Figure I.14. Robot cylindrique	10
Figure I.15. Robot sphérique.....	10
Figure I.16. Robot SCARA	11
Figure I.17. Robot 3R.....	11
Figure I.18. Moteurs pas à pas hybride bipolaire	12
Figure I.19. Structure d'un moteur pas à pas (montage bipolaire).....	12
Figure I.20. Constituants de MCC et leur Circuit équivalent.....	13
Figure I.21. Principe de fonctionnement d'un capteur	13

Figure I.22. Capteurs photoélectrique, potentiomètre et gyroscope respectivement.	14
Figure I.23. Principe de fonctionnement du potentiomètre.....	15
Figure I.24. Principe de fonctionnement d'un capteur photoélectrique	15
Figure I.25 : Architecture d'une carte arduino	16
Figure I.26 : Les entrées / sorties numériques.....	17
Figure I.27 : Les entrées analogiques	17
Figure I.28 : Les tensions de référence.....	18
Figure I.29: langage de programmation arduino	18
Figure II.1. Types de défauts.....	20
Figure II.2. Classification des défauts (additifs et multiplicatifs)	21
Figure II.3. Classification des méthodes de diagnostic	22
Figure III.1: Logiciel de conception mécanique 3D SolidWorks	25
Figure III.2: Les composants de la base de notre robot	26
Figure III.3: Porteur d'actionneur	27
Figure III.4: montage de premier bras.....	27
Figure III.5: montage de deuxième bras.....	28
Figure III.6: les éléments de fixation.....	28
Figure III.7:Modèle géométrique direct	29
Figure III.8: Paramètres géométriques	30
Figure III.9: repères du Robot	30
Figure III.10 : projection du robot.....	33
Figure III.11:Modèle géométrique inverse.....	33
Figure III.12:Modèle cinématique direct.....	37
Figure III.13:Modèle cinématique inverse	37
Figure III.14 : forme parallèle pipette	39
Figure III.15. Première articulation.....	40
Figure III.16 Premier bras	40

Figure III.17 : Le schéma électronique de driver L298N.....	42
Figure III.18: schéma de commande du moteur pas à pas avec le L298N.....	43
Figure III.19 : commande de robot en boucle ouverte	43
Figure III.20 : Schéma bloc du moteur pas à pas dans MATLAB Simulink	45
Figure III.21. Courant de la phase A (ia)	46
Figure III.22. Courant de la phase B (ib)	46
Figure III.23. La position $\Theta(t)$ du moteur	47
Figure III.24. La vitesse $\omega(t)$ du moteur	47
Figure III.25. Schéma bloc de système de diagnostic	49
Figure III.26. Résidu 1 en temps réel	49
Figure III.27: résidu 2 en temps réel	50
Figure III.28: résidu 3 en temps réel	50
Figure III.29. Schéma bloc de système de diagnostic avec défaut.....	51
Figure III.30: résidu 1 en temps réel	51
Figure III.31: résidu 2 en temps réel	52
Figure III.32: résidu 3 en temps réel	52
Figure III.33: résidu 1 en temps réel	53
Figure III.34: résidu 2 en temps réel	53
Figure III.35: résidu 3 en temps réel	54
Figure III.36: résidu 1 en temps réel	54
Figure III.37: résidu 2 en temps réel	55
Figure III.38: résidu 3 en temps réel	55

Liste Des Tableaux

Tableau III.1: Paramètres géométriques.....	31
Tableau III.2. Spécifications des paramètres du Moteur pas à pas	45
Tableau III.3: La matrice de signature	48

Introduction
Générale

Introduction

Depuis longtemps et jusqu'à aujourd'hui, l'homme, toujours en quête d'une vie facile, a toujours opter pour la création de nouveaux mécanismes et outils qui peuvent le remplacer dans ses tâches quotidiennes ou du moins l'aider à les accomplir. De nos jours, et après une avancée technologique, informatique et industrielle phénoménale, le besoin de ces mécanismes, plus avancée certes, est devenu plus que nécessaire.

Parmi ces mécanismes, on peut distinguer les robots. La technologie des robots est utilisée pratiquement dans toutes les industries qui exigent des critères de précision, rapidité et efficacité, donc on peut dire que c'est un sujet de recherche par excellence.

Utilisés dans l'industrie depuis maintenant plusieurs dizaines d'années, les robots industriels, actuellement en service, sont des robots de type manipulateur. Ils sont bien implantés dans les procédés de fabrication modernes et sont employés pour augmenter le volume de production et améliorer la qualité du produit.

Il existe plusieurs types de robots conçus pour des tâches bien spécifiques. Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes intéressés aux robots manipulateurs pour des applications en robotique industrielle.

L'objectif principal de notre travail est de réaliser un prototype d'un bras manipulateurs, ainsi que son circuit de commande via le microcontrôleur Arduino, Ce dernier a pour fonction de traiter les informations entrantes pour émettre des ordres de sorties en fonction d'un programme. Et par la suite, effectuer dessus une opération de diagnostic.

Le bras manipulateur est un système de positionnement ou les forces agissant au niveau des articulations sont produites par des actionneurs. Ces derniers peuvent être de types électrique, hydraulique ou pneumatique.

Dans notre mémoire nous nous sommes intéressés particulièrement au cas des moteurs pas à pas.

Chapitre I:
Généralités Sur Les
Robots Industriels

I.1. Introduction

L'utilisation des systèmes robotiques apparaît aujourd'hui dans plusieurs domaines d'activités: la médecine, la défense, la recherche scientifique etc.... Les robots sont utilisés de manière privilégiée pour des missions où les objectifs sont quantifiables et clairement définis. Ils sont destinés à faciliter les tâches pour l'homme et à amplifier le rendement.

Dans ce premier chapitre, on va donner un aperçu non exhaustif sur les robots, un bref historique sur l'évolution de la robotique industrielle et présenter les différents types de robots et les éléments constitutifs de ces derniers.

I.2. Définition générale

I.2.1. La robotique

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 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 [1].

I.2.2. Le robot industriel

Le terme robot a été introduit pour la première fois par l'auteur Tchèque Capek en 1920 dans sa pièce de théâtre R.U.R. (Rossum's Universal Robot) et il est dérivé du mot robota qui signifie travailleur (de force) [2].

Un robot est un dispositif *mécatronique* (alliant mécanique, électronique et informatique, et automatique) accomplissant automatiquement des tâches diverses. C'est une machine intelligente fonctionnelle qui nécessite une autonomie de mouvements.

L'Organisation Internationale de Normalisation définit le robot comme étant un manipulateur à plusieurs degrés de liberté, à commande automatique, reprogrammable, multi-applications, mobile ou non, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle. [3]

I.3. L'histoire de la robotique industrielle

La robotique industrielle a connu un essor entre 1950-1970. Elle a vu le jour en 1954 lorsque **Georges DEVOL** a pu réaliser son brevet sur la robotique. Dans ce brevet **Devol** a conçu un robot qu'il a intitulé Unimate [3].

En 1961, le premier Unimate fut utilisé dans les usines de **GENERAL MOTORS**. En 1966, l'entreprise Unimation continue de développer des robots et élaborent notamment des robots permettant de faire d'autres tâches, comme des robots de manipulation matérielle ou encore des robots conçus pour la soudure ou pour d'autres applications de ce genre. En 1978 un nouveau robot est conçu par **Unimation Inc** avec l'aide de **General Motors** [3].

Ensemble ils conçurent le robot PUMA 500. Le robot **PUMA** (Programmable Universal Machine for Assembly) a été conçu par **Vic Schienman** et fut financé par **General Motors** et par **The Massachusetts Institute of Technology** au milieu des années 70. Le système de ce robot est composé d'un bras manipulateur permettant d'assembler des composants industriels et de son ordinateur de commande. Ce robot est le robot d'assemblage le plus répandu dans l'industrie des années 70 [3].

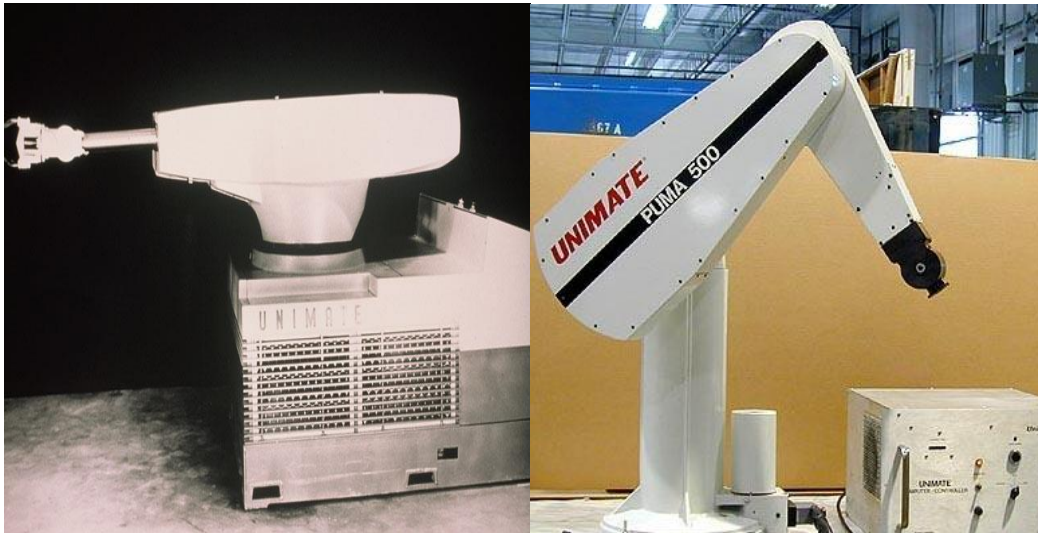


Figure I.1. Robotique industrielle (Unimate, PUMA)

En 1985, Reymond Clavel a imaginé le Robot Delta qui possède un bras de manipulation formé de 3 parallélogrammes. Son brevet tombe dans le domaine public en 2007 et différents constructeurs devraient alors sortir leur propre robot delta [3].

Le Jet Propulsion Laboratory (JPL) développe un robot industriel hexapode (à 6 pattes) du nom de Lemur. Lemur aura pour mission de monter, assembler et réparer des installations spatiales. Pesant moins de 5 kg, il offre la possibilité innovante d'adapter différents outils sur chacun de ses membres [3].

Selon l'étude robotique de la Fédération Internationale de Robotique (IFR) en 2012, il y a au moins 1 153 000 robots industriels opérationnels fin 2011 dans le monde [3].

I.4.Types de robots

Il existe plusieurs types de robots. Les plus utilisées sont : robots mobiles et robots manipulateurs.

I.4.1.Robots mobiles

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

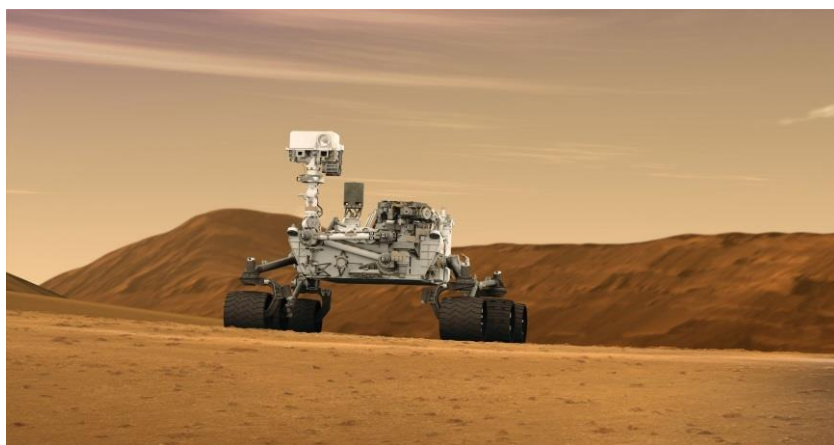


Figure I.2: Spirit, NASA, sur Mars

I.4.2. Robots manipulateurs

Des robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise répétitive, (tels que les robots industriels, médicaux...).



Figure I.3: Robot Kuka

I.5. Les éléments constitutifs d'un robot

Dans un robot en fonctionnement, on peut distinguer plusieurs ensembles interactifs comme montre la figure I.4.

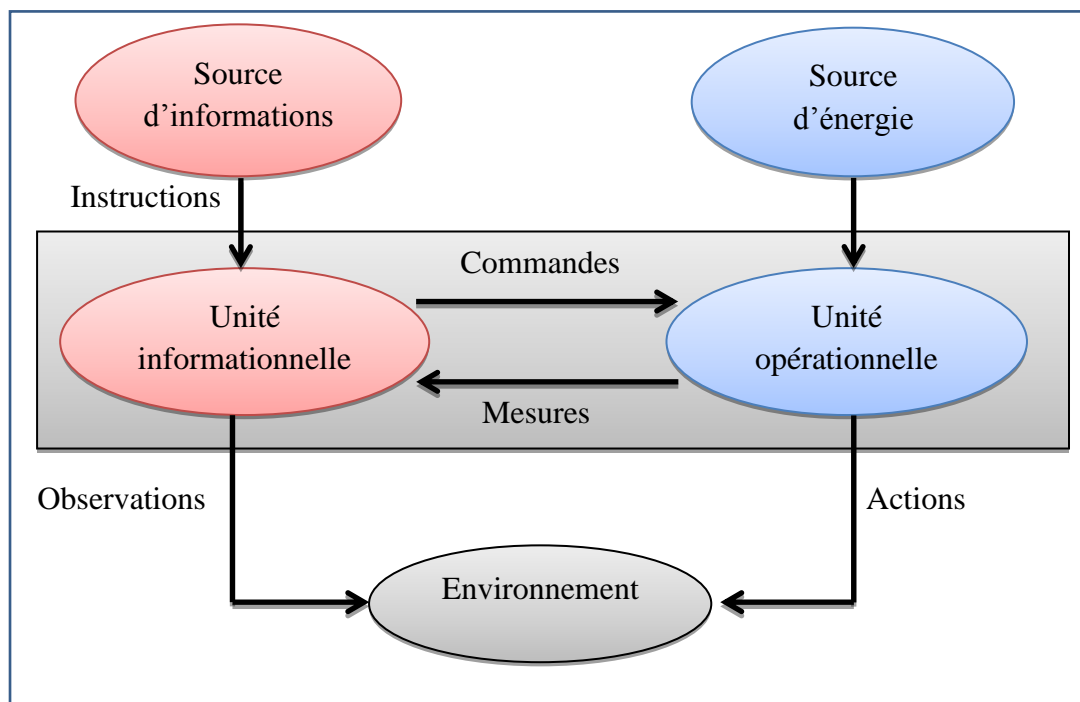


Figure I.4. Structure fonctionnelle d'un robot.

I.5.1. Unité opérationnelle

Exerce les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. Cette partie, qui constitue le robot physique, 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 de 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 [4].

I.5.2. Unité informationnelle

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 permanente selon le cycle information-décision-action [5].

I.6. Structure mécanique articulée (SMA)

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un organe terminal qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides reliés entre eux, généralement les uns à la suite des autres où chaque solide est mobile par rapport au précédent. Cette mobilité s'exprime en termes de degrés de liberté (D.D.L) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide par rapport au solide qui lui est directement relié.

Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série dans les quelles tous les corps ont au plus deux liaisons, ou bien arborescentes où au moins l'un des corps a plus de deux liaisons. Les chaînes peuvent aussi être fermées dans lesquelles l'organe terminal est relié à la base du mécanisme par l'intermédiaire de plusieurs chaînes [4].

I.6.1. Structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple

C'est une chaîne cinématique dont chaque membre possède un degré de connexion (nombre de liaisons mécaniques) inférieur ou égal à deux. Un robot sériel est formé d'une chaîne cinématique simple dont la base et l'organe effecteur possèdent un degré de connexion de un (c'est-à-dire qu'il n'est relié qu'à un seul corps) et les autres éléments un degré de connexion de deux (figure I.5) [1].

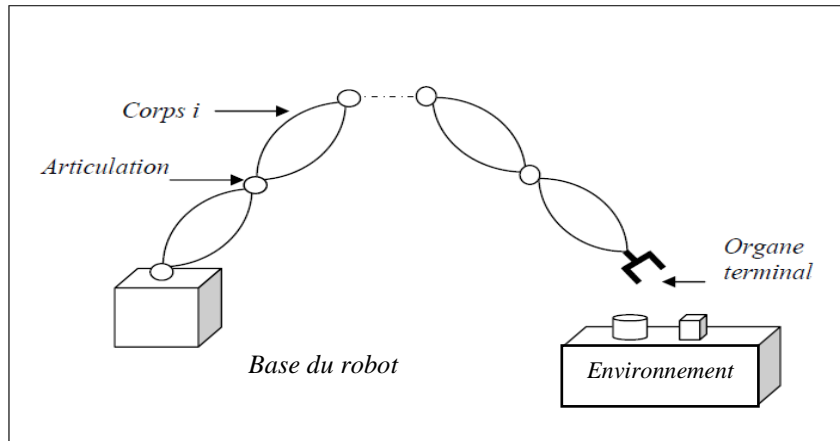


Figure I.5. Robot à chaîne ouverte simple

I.6.2. Structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée

C'est une chaîne cinématique qu'il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne (figure I.6).

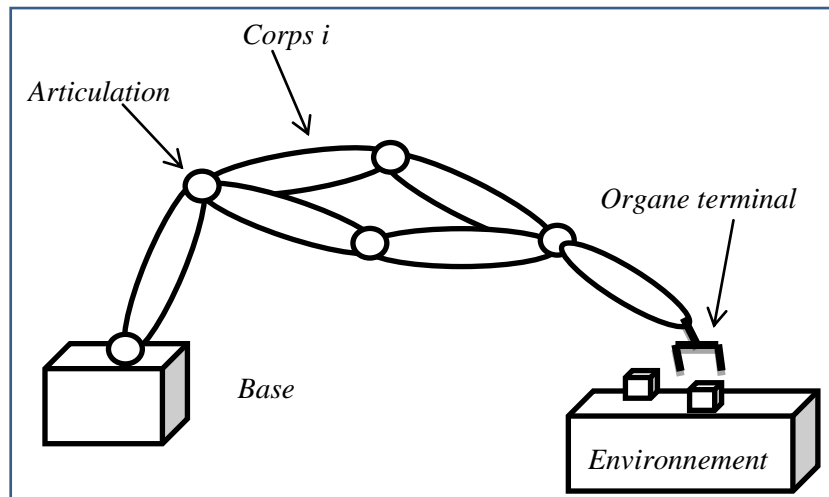


Figure I.6. Robot à chaîne fermée.

I.7. Architecture des robots

L'architecture générale d'un robot manipulateur est donnée par la figure I.7.

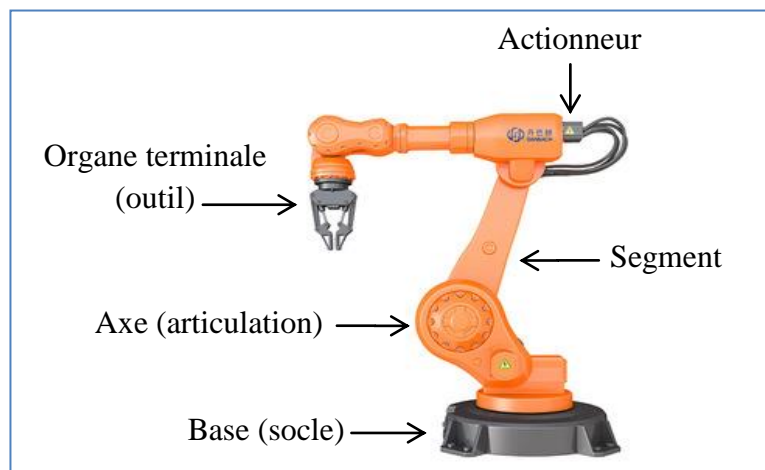


Figure I.7. Architecture d'un robot.

I.7.1. 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.7.2. Le porteur

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

- **Segment** : corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres,
 - **Articulation** : Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre.
- ✓ **Articulation rotoïde**

Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe (figure I.8).

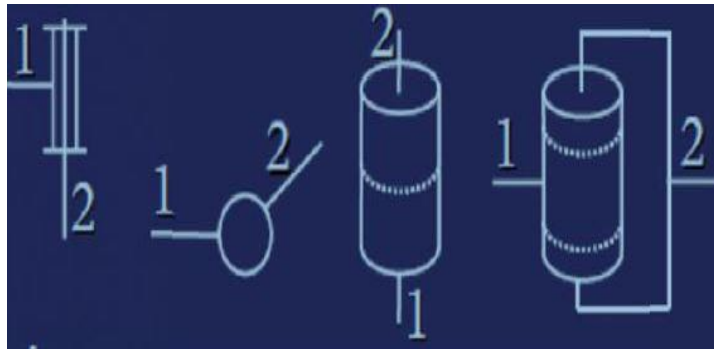


Figure I.8. Représentation d'une articulation rotoïde.

✓ **Articulation prismatique**

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe (Figure I.9).

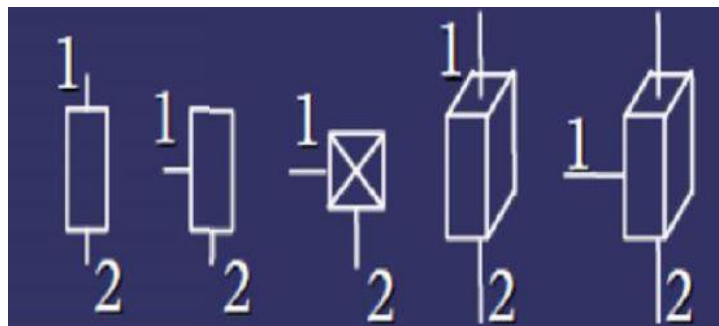


Figure I.9. Représentation d'une articulation prismatique.

I.7.3. L'actionneur

Les actionneurs sont les «muscles» de manipulateurs. Le contrôleur envoie des signaux aux actionneurs, qui, à son tour, déplacent les articulations du robot et des jonctions, les types communs des actionneurs sont les servomoteurs, les moteurs pas à pas, les

actionneurs pneumatiques et les vérins hydrauliques. Les actionneurs sont sous le contrôle du contrôleur.

I.7.4. L'organe terminal (Effecteur)

Cette partie est reliée à la dernière jonction (main) d'un manipulateur qui gère généralement les objets, établit des connexions à d'autres machines ou effectue les tâches requises.

I.8. Classification des robots

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

I.8.1. Classification fonctionnelle

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

- **Manipulateur à commande manuelle :**

Un bras manipulateur exerce sa tâche avec l'intervention de l'opérateur (figure I.10).



Figure I.10. Manipulateur à commande manuelle

- **Manipulateur automatique**

Un bras manipulateur qui exerce des mouvements de soudure sans l'intervention de l'homme (figure I.11).

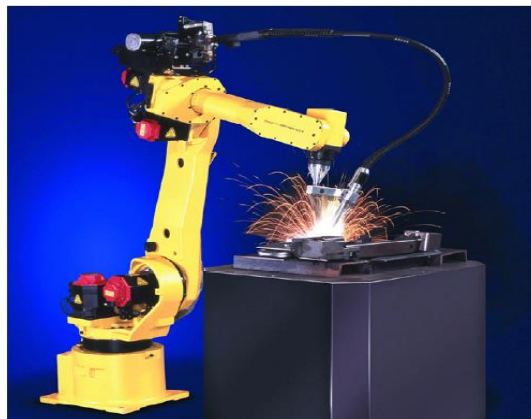


Figure I.11. Manipulateur à cycle prééglé

- **Robots programmables**

Ces types des robots répètent les mouvements qu'on leur a appris ou programmés sans informations sur l'environnement ou la tâche effectuée comme le montre la Figure I.11.

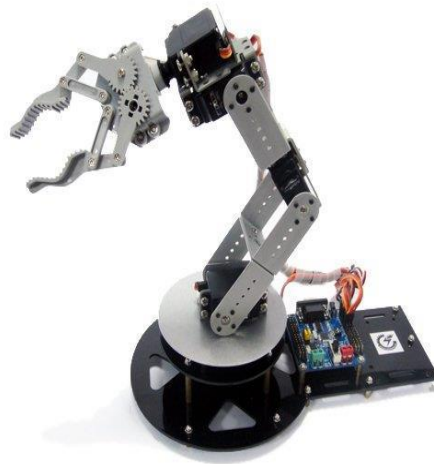


Figure I.11. Manipulateur programmable

- **Robots humanoïde**

On trouve actuellement des robots de seconde génération qui sont capables d'acquiescer et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs d'efforts,...) comme le montre la Figure I.12. 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 [5].



Figure I.12. Manipulateur intelligent

I.8.2. Classification géométrique

On peut aussi classer les robots suivant leur configuration géométrique, autrement dit l'architecture de leur porteur.

- **La structure cartésienne (PPP)**

C'est une structure à trois liaisons prismatiques et est la plus ancienne. Historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure est relativement peu utilisée sauf dans quelques applications particulières telles que robots pratiques, robots de magasinage (figure I.13) [4].

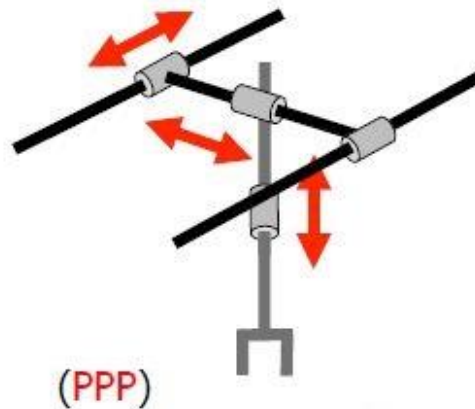


Figure I.13. Robot cartésien

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

Cette structure associe une rotation et deux translations. Elle présente l'inconvénient d'offrir un volume de travail faible devant un encombrement total important. Elle n'est pratiquement plus utilisée (figure I.14) [4].

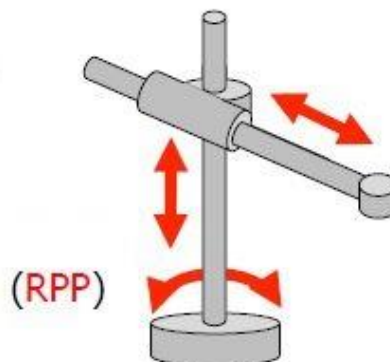


Figure I.14. Robot cylindrique

- **La structure sphérique ou polaire**

C'est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structure cylindrique (figure I.15).

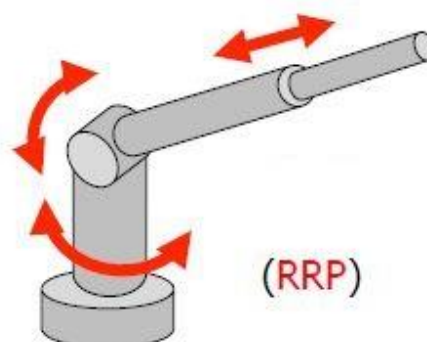


Figure I.15. Robot sphérique

- **La structure dite SCARA**

A axes de rotation parallèles, elle est l'une des plus utilisées en particulier pour des tâches de manutention ou d'assemblages très fréquents dans l'industrie (figure I.16).

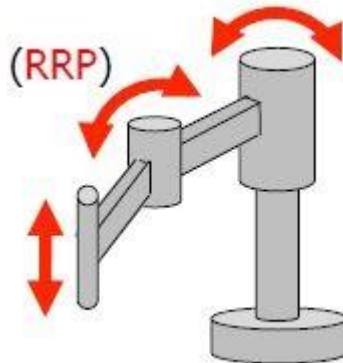


Figure I.16. Robot SCARA

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

Elle permet d'amener un solide en un point de l'espace par trois rotations, généralement une à axe vertical et deux à axes horizontaux et parallèles. C'est le porteur généraliste par excellence pouvant se programmer facilement pour différents types de tâches et disposant d'un volume de travail conséquent (figure I.17) [4].

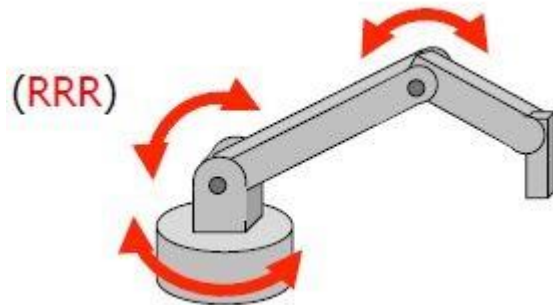


Figure I.17. Robot 3R

I.9. Les actionneurs

Les actionneurs sont des convertisseurs électromécaniques conçus pour mettre en mouvement des systèmes mécaniques à partir de commandes électriques.

Il existe plusieurs types, les plus utilisés dans la robotique sont de type électrique tel que les moteurs à courant continu et les moteurs pas à pas. Dans notre mémoire nous nous sommes intéressés particulièrement au cas des moteurs pas à pas.

I.9.1. Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire). Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor. L'interaction électromagnétique entre ces deux parties assure la rotation (figure I.18).

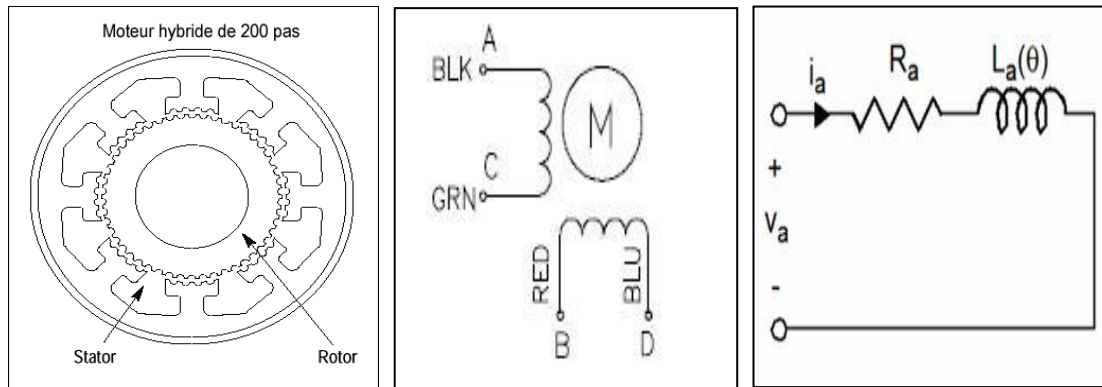


Figure I.18. Moteurs pas à pas hybride bipolaire

I.9.2. Principe de fonctionnement

Dans notre cas l'aimant est bipolaire (un pôle nord et un pôle sud). Le stator présente 2 phases (bobine 1 et bobine 2) comme montre la figure I.19.

- Si on alimente la bobine 1, dans le sens +I, l'aimant va se placer en position.
- Si l'on supprime le courant dans la bobine 1 et qu'on l'établit dans la bobine 2 dans le sens -I, l'aimant va tourner de 90° et va se placer en position.
- Si l'on supprime le courant dans la bobine 2 et qu'on l'établit dans la bobine 2 dans le sens -I, l'aimant va tourner de 90° et va se placer en position.

On rétablit enfin le courant dans la bobine 2, dans le sens +I l'aimant va se placer en position.

L'aimant a donc 4 positions possibles par tour. On dit que l'angle de pas, ou le pas est de 90°. On a donc un moteur pas à pas de 4 pas par tour.

Les bobinages d'un moteur bipolaire sont alimentés une fois dans un sens, une fois dans l'autre sens. Ils créent une fois un pôle nord, une fois un pôle sud d'où le nom de bipolaire.

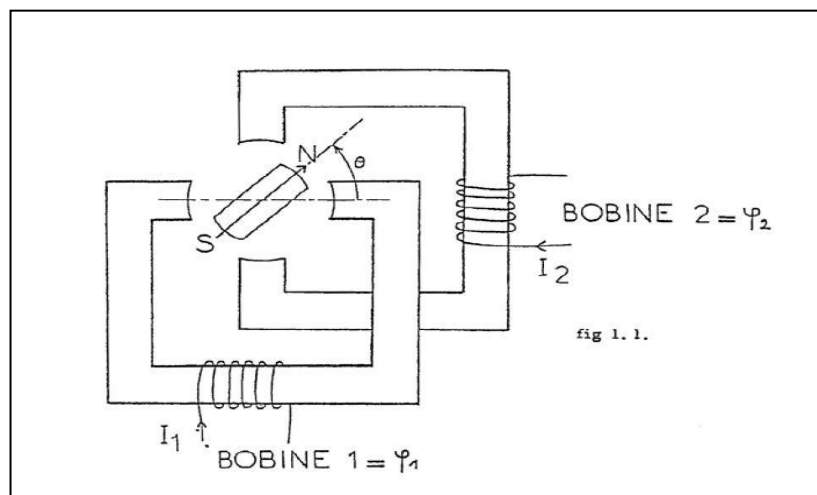


Figure I.19. Structure d'un moteur pas à pas (montage bipolaire)

I.9.3. Moteur à courant continu

La moteur à courant continu est constituée de deux parties principales appelées le rotor et le stator (voir la figure I.20).

- Le stator : il est appelé aussi l'inducteur. C'est la partie fixe du moteur. Il a pour fonction de créer un champ magnétique reçu par les bobines du rotor. Il peut être constitué d'aimants permanents ou de bobines alimentées par un courant [11].
- Le rotor : il est appelé aussi l'induit. Il représente la partie tournante du moteur. Il est constitué d'un enroulement de spires conductrices réunies en faisceaux, disposés de telle manière que lorsqu'un côté est soumis au pôle nord, l'autre est au pôle sud [11].

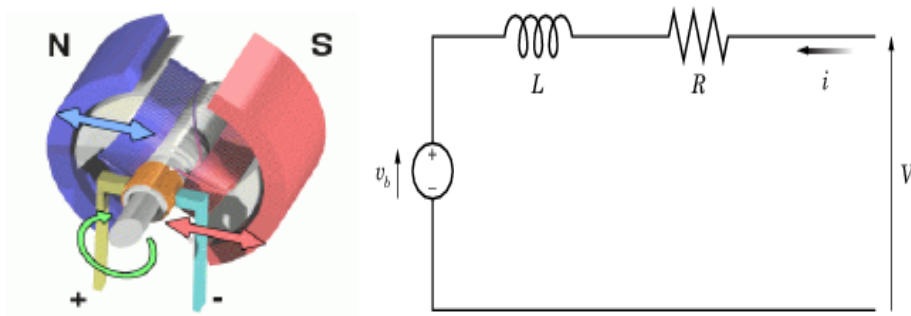


Figure I.20. Constituants de MCC et leur Circuit équivalent

I.10. Les capteurs

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

I.10.1. Définition

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande (figure I.21).

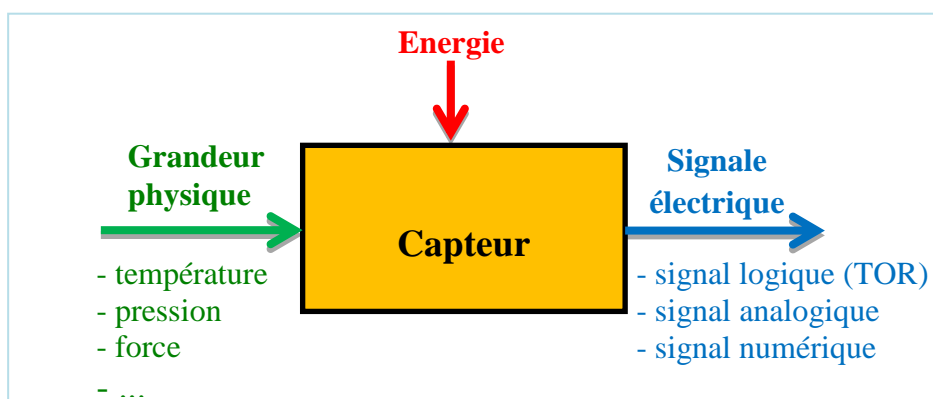


Figure I.21. Principe de fonctionnement d'un capteur

Il existe deux types du capteur selon leur fonctionnement :

- **Capteur passif** : Il s'agit en général d'une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique, il faut l'intégrer dans un circuit avec une alimentation.

- **Capteur actif** : 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 propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

I.10.2. Propriétés statiques

- **Linéarité** : Un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante. La relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est alors linéaire (équation d'une droite).
- **Sensibilité** : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

$$S_c = \frac{d(\text{entrée})}{d(\text{sortie})}$$

- **Plage de mesure** : C'est la gamme des valeurs d'entrée qu'il peut traiter sans dégrader son fonctionnement.

I.10.3. Propriétés dynamiques

- **Bande passante** : C'est la plage de fréquence pour laquelle le fonctionnement du capteur est correct.

On lui applique une variation périodique de la grandeur physique d'entrée, on mesure la sortie associée et on trace la sensibilité du capteur en fonction de la fréquence (sensibilité dynamique). Ceci permet de mesurer sa bande passante à -3dB.

- **Rapidité** : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

Dans notre travail on s'intéresse aux deux types des capteurs : capteurs de vitesse (le capteur photoélectrique) et les capteurs de position telle que le potentiomètre et le gyroscope (figure I.22).

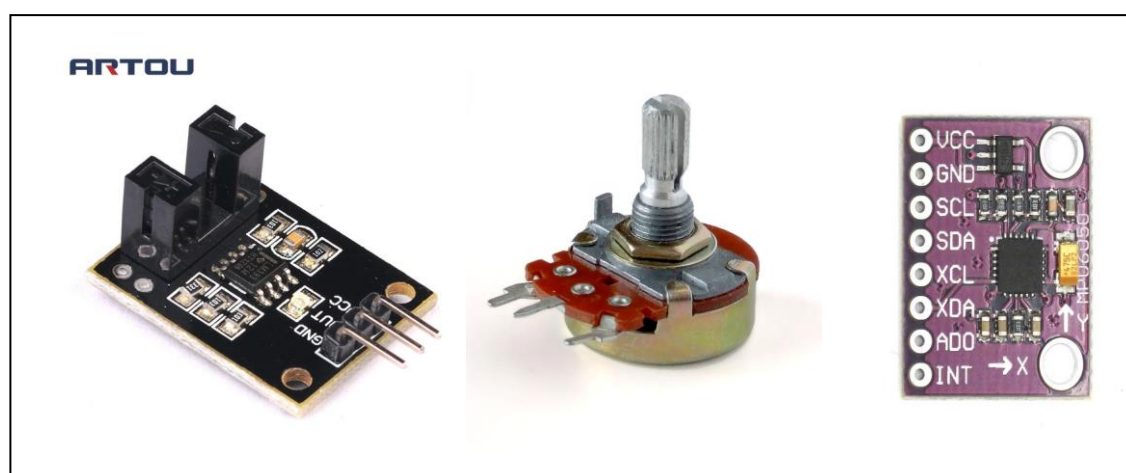


Figure I.22. Capteurs photoélectrique, potentiomètre et gyroscope respectivement.

I.10.4. Le potentiomètre

Pour mesurer la position d'un objet, il suffit de le relier mécaniquement au curseur C d'un potentiomètre comme montre la figure I.23.

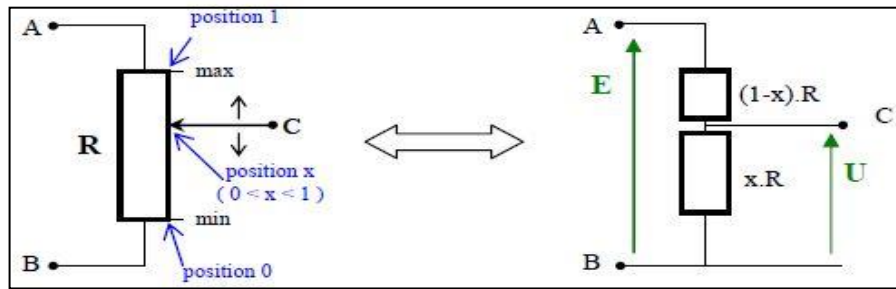


Figure I.23. Principe de fonctionnement du potentiomètre

On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre. La tension U en sortie aura l'expression suivante :

$$U = E(x.R)/R = x.E$$

La tension U en sortie est donc proportionnelle à la position x du curseur.

I.10.5. Le capteur photoélectrique

Un codeur rotatif est un capteur de position angulaire. Lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Ce disque comporte une succession de parties opaques et transparentes. Une lumière émise par des diodes électroluminescentes, (DEL) traverse les fentes de ce disque et crée sur les photodiodes réceptrices un signal analogique. Une interface électronique amplifie ce signal puis le convertit en signal carré qui est alors transmis à un système de traitement (figure I.24).

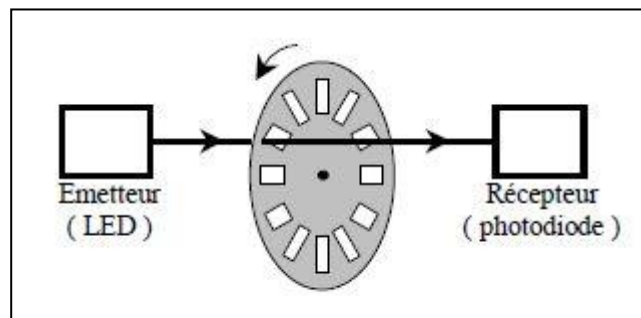


Figure I.24. Principe de fonctionnement d'un capteur photoélectrique

I.11. Carte de commande Arduino

Un microcontrôleur est un système qui ressemble à un ordinateur : il a une mémoire, un processeur, des interfaces avec le monde extérieur. Les microcontrôleurs ont des performances réduites, mais sont de faible taille et consomment peu d'énergie, les rendant indispensables dans toute solution d'électronique embarquée (voiture, robots, ...). La carte Arduino n'est pas le microcontrôleur le plus puissant, mais son architecture a été publiée en open-source.

I.11.1. Définition

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation (figure III.13).

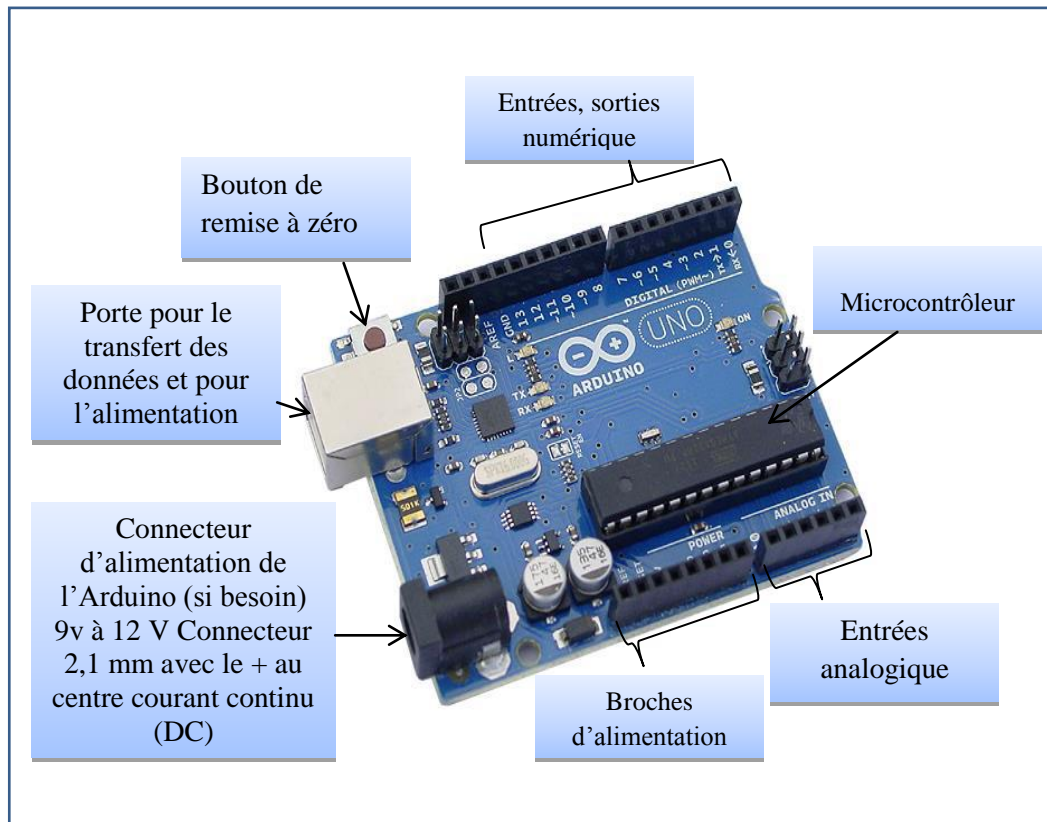


Figure I.25 : Architecture d'une carte arduino

I.11.2. Matériel arduino

La carte Arduino repose sur un circuit intégré (un mini-ordinateur appelé également microcontrôleur) associée à des entrées et sorties (I/O – input/output) qui permettent à l'utilisateur de brancher différents types d'éléments externes :

- **les entrées**, Les entrées sont lues par le microcontrôleur, ce qui lui permet de connaître l'état du système auquel il est relié.
- **les sorties**, sont contrôlées par la carte, cela permet au programme du microcontrôleur de déclencher des actions (allumer ou d'éteindre une LED, un ventilateur, un moteur...).

I.11.2.1. Entrées / Sorties (I/O) numériques

Les entrées / sorties numériques ne peuvent prendre que deux valeurs, la valeur LOW (~ 0 V), et la valeur HIGH (~ 5 V). La valeur d'un port numérique peut donc être codée sur un bit, 0 ou 1 (true ou false).

La carte arduino comporte 14 I/O numériques (appelées DIGITAL sur la carte), numérotées de 0 à 13 (voir le schéma ci-dessus), et appelées D0, D1, D2, ... D13. Chacun de

ces ports peut-être déclaré comme étant une entrée ou comme une sortie dans le programme du microcontrôleur. Les deux premiers ports (D0 et D1) sont réservés à la communication série, il ne faut pas les utiliser. Le dernier port, D13, possède un indicateur lumineux, une LED qui s'allume quand le port est HIGH, et qui s'éteint quand le port est LOW. Le port GND est la masse de la carte (0 V), (figure III.14).

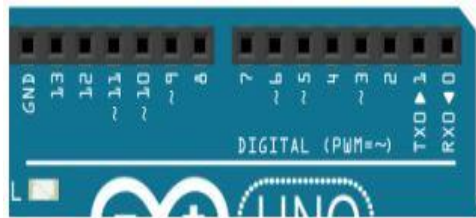


Figure I.26 : Les entrées / sorties numériques

I.11.2.2. Entrées / Sorties I/O analogique

- **Entrées analogiques**

Une entrée analogique est une sorte de voltmètre : la carte lit la tension qui est appliquée sur le port. Cependant le microcontrôleur ne travaille qu'avec des chiffres : il faut donc transformer la tension appliquée en sa valeur numérique. C'est le travail du convertisseur analogue/digital, dit « CAD ».

Le CAD de la carte arduino travaille sur 10 bits : il accepte en entrée une tension comprise entre 0 V et V_{ref} une tension de référence, et fournit au microcontrôleur un chiffre entier compris entre 0 et 1023 ($= 2^{10} - 1$). Une tension inférieure à 0 V est lue comme 0, une tension supérieure à V_{ref} est lue comme 1023, une tension intermédiaire est lue comme un entier entre 0 et 1023, avec une relation linéaire. La tension V_{ref} est 5 V par défaut, mais cette valeur peut être changée dans le programme (figure III.15).



Figure I.27 : Les entrées analogiques

- **Sorties analogiques**

La carte arduino ne possède pas de vraie sortie analogique, capable de produire une tension d'une valeur arbitraire choisie par l'utilisateur. Certains ports numériques peuvent cependant servir de sortie analogique en utilisant la technique de PWM (Pulse Width Modulation) : il s'agit des ports 3, 5, 6, 9, 10 et 11 (signalés par un ~ sur la carte). Ces ports peuvent simuler une tension entre 0 et 5 V en basculant rapidement entre leur état LOW (0 V) et HIGH (5 V). La valeur moyenne de la tension est alors 2.5 V si le port passe autant de temps dans un état que dans l'autre, mais en changeant ce rapport, la valeur moyenne de la tension peut être contrôlée de 0 à 5 V.

I.11.2.3. Tensions de références

La carte arduino fournit des ports permettant d'accéder à certaines tensions de référence.

GND est la référence de la carte arduino par rapport à laquelle toutes les différences de tension sont mesurées. Si la carte est reliée à l'ordinateur par un câble USB, cette tension est celle de la terre. Les ports 5V et 3V3 donnent accès aux tensions de 5 V et de 3.3 V. Ces tensions sont normalement régulées et précises. Une exception : quand la carte est branchée sur un port USB sans alimentation externe, le port 5 V ne provient plus de la carte arduino mais directement du câble USB, la tension de référence 5 V n'est alors plus aussi bien régulée (figure III.16).

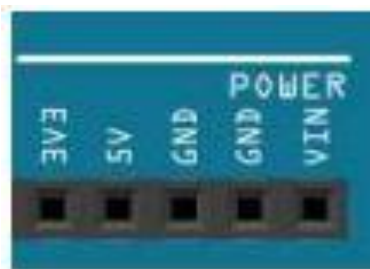


Figure I.28 : Les tensions de référence

I.11.2. Langage de programmation

L'environnement de programmation Arduino (IDE en anglais) est une application gratuite et open source, développée en Java elle était inspirée du langage Processing, et dont la simplicité d'utilisation L'IDE permet d'écrire et de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte (figure III.17).

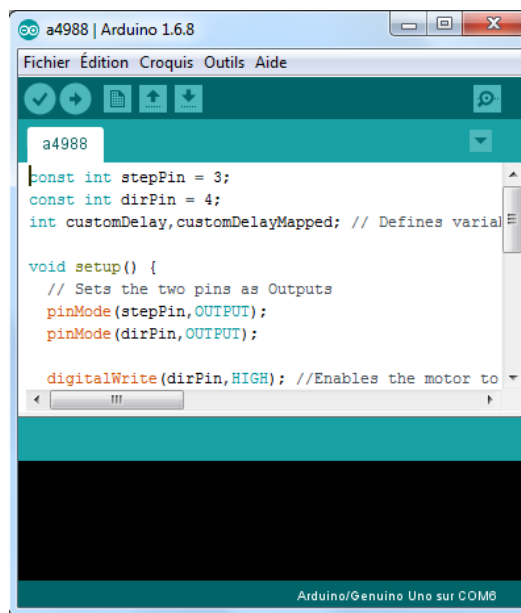


Figure I.29: langage de programmation arduino

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les robots industriels et leurs types, ainsi qu'une brève description des actionneurs et des capteurs qu'on a utilisés dans notre projet et leur principe de fonctionnement. Dans le chapitre suivant on va présenter les différentes méthodes de diagnostic des systèmes mécatroniques.

Chapitre II:
Etude De L'art Sur Les Méthodes De
Diagnostic

II.1. Introduction

Le diagnostic n'est qu'un module d'un processus complet permettant à une installation de fonctionner en respectant des critères de sécurité, de productivité et de qualité même en présence de défaillance. La commande du système peut être conçue de manière à utiliser les informations fournies par le module de diagnostic. Pour éviter les problèmes provoqués par l'apparition des défauts.

II.2. Quelques définitions

- **Défaut** : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et sa caractéristique théorique.
- **Défaillance** : Une défaillance est l'altération ou la cessation d'un dispositif à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. Une défaillance résulte d'un défaut.
- **Panne** : Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Le diagnostic** : est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Couramment, le diagnostic est exprimé par les états des composants ou l'état des relations de description du comportement [7].

Un système de diagnostic réalise les tâches suivantes :

- **Détection de défaut** : indication que quelque chose est incorrect dans le système surveillé. La détection est une nécessité absolue dans tout système pratique.
- **Localisation de défaut** : détermination de l'emplacement exact du défaut (le composant en défaut). Elle est presque aussi importante que la détection.
- **Identification de défaut** : détermination de l'amplitude du défaut. L'identification (si utile) peut ne pas justifier l'effort supplémentaire qu'elle requiert

II.3. Type de défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur location, définissant alors des types de défauts : actionneurs, capteurs et composants comme indique la figure II.1.

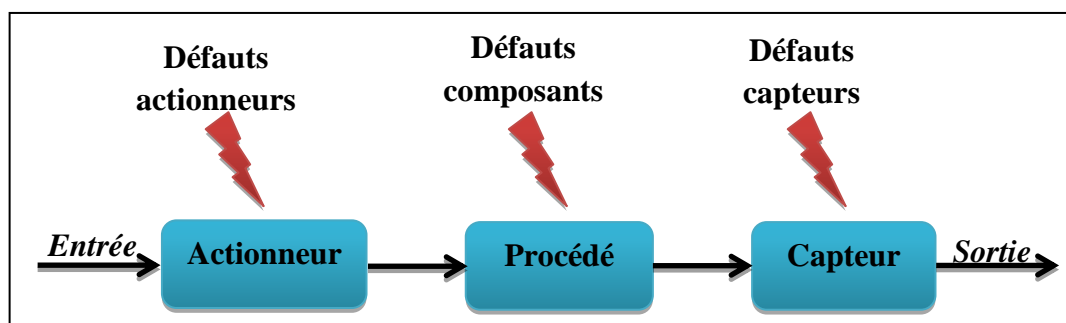


Figure II.1. Types de défauts

II.3.1. Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent ainsi le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Par exemple dans le cas d'une perte totale, lorsque un actionneur est resté "coller" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur.

Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissent de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leurs action sur le système [7].

II.3.2. Défauts capteurs

Ce type de défauts est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus au moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur totale produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer [7].

II.3.3. Défauts systèmes ou composants

Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, c'est-à-dire les défauts qui ne peuvent être classifiés ni parmi les défauts capteurs, ni parmi les défauts actionneurs. Ils représentent des changements dans les paramètres du système, ce qui induit un changement du comportement dynamique de ce dernier [7].

Comme aussi, les défauts peuvent être classés relativement à leurs effets sur les performances du système, dont deux classes de défauts peuvent être distingués : des défauts additifs et des défauts multiplicatifs (figure II.2):

- **Défauts multiplicatifs** : Les défauts au niveau de la dynamique du procédé sont modélisés par des défauts multiplicatifs. Ils correspondent aux modifications paramétriques du modèle représentant le système. Ces derniers induisent des changements sur la corrélation du signal de sortie du système, ainsi que des changements dans la dynamique du système [8].
- **Défauts additifs** : ces défauts sont modélisés sous forme de termes additifs dans le modèle du système. Ils influent sur l'état ou sur sa sortie. Cette modélisation est habituellement attribuée aux défauts de capteurs et d'actionneurs [8].

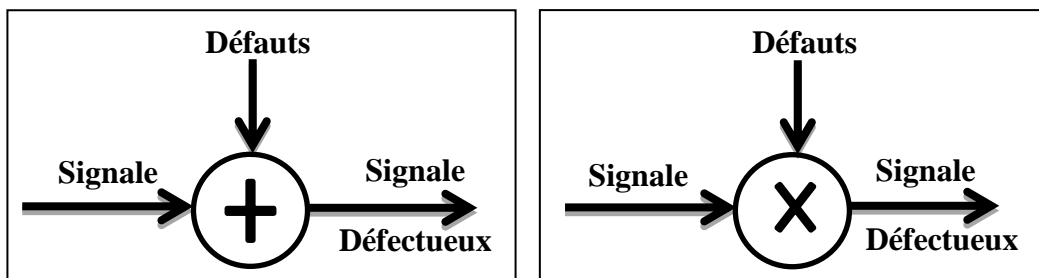


Figure II.2. Classification des défauts (additifs et multiplicatifs)

II.4. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic de défaillances et de dégradations utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés comme indique la figure II.3.

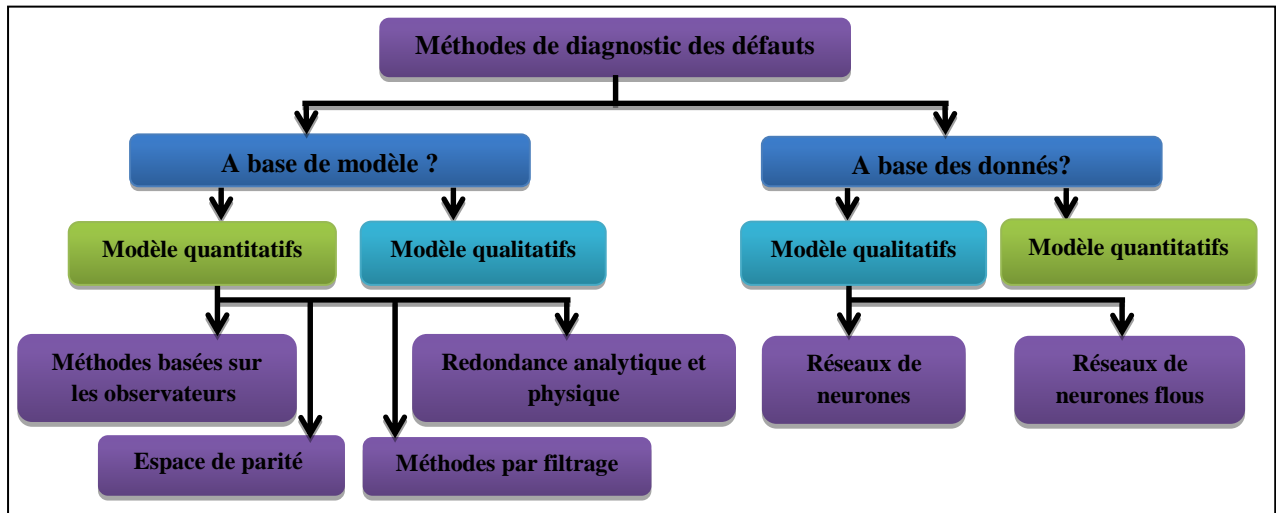


Figure II.3. Classification des méthodes de diagnostic

II.4.1. Méthodes de diagnostic à base des données

Cette méthode basée sur l'historique du système, peut analyser et traiter les données, là on distingue deux types : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. Les méthodes qualitatives reposent sur le principe de l'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones et les réseaux neurones flous.

Les réseaux neurones sont une fonction algébrique non linéaire, qui peut être statique ou dynamique. Ils sont utilisés pour créer une base de donnée entre les entrées qui représentent les effets et les sorties qui représentent les causes.

Les réseaux de neurones flous utilisent le même principe que les réseaux neurones pour le diagnostic des systèmes avec le raisonnement flous qui est capable de traiter l'information (les données numérique) [9].

II.4.2. Méthodes de diagnostic à base de modèle

Les méthodes basées sur le modèle dynamique et la structure du système, appelées aussi méthodes à base de modèle, s'appuient sur la connaissance physique du système. L'utilisation des modèle graphique au analytique pour décrire les relations entre les entrées et les sorties du système. Ces méthodes peuvent être classifiées en deux catégories : Les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives.

Les méthodes quantitatives sont basées sur une modélisation analytique des relations entrées-sorties du système.

Le diagnostic à base de modèle repose sur la génération des signaux indicateurs des défauts appelés les résidus, obtenus par la comparaison entre le comportement observé et le comportement prédit du système physique. La classification des différents résidus permet d'isoler le défaut. Il existe plusieurs méthodes de génération des résidus : les observateurs, la relation de redondance analytique et physique, par filtrage, et espace de parité [8].

II.4.2.1. Méthodes basées sur les observateurs

Lorsque l'état du système n'est pas mesurable, on construit un observateur qui permet de reconstruire l'état du système à partir de son modèle dynamique et des mesures d'autres grandeurs. Cette méthode s'applique aussi bien pour le diagnostic des systèmes linéaires et non linéaires.

Le principe de diagnostic à base d'observateur consiste à réaliser une estimation des sorties du système à partir des grandeurs accessibles à la mesure. C'est-à-dire faire une comparaison entre les mesures réelles du système et les mesures estimées à l'aide d'un observateur, ce qui permet l'obtention des résidus. Le vecteur résidu est alors construit comme l'écart entre la sortie estimée et la sortie mesurée, à la présence d'un défaut les résidus doivent être non-nul.

Pour détecter et isoler, les résidus générés ne sont généralement pas nuls en fonctionnement normal à cause des bruits et des incertitudes (perturbation) [10].

II.4.2.2. Espace de parité

La conception d'un diagnostic par l'espace de parité est basée sur le développement des expressions analytiques. Des résidus sont générés en employant des équations de parité qui sont obtenues par reconstruction de la structure du modèle et en transformant les variables du système. La réécriture du modèle est équivalente à éliminer du modèle initial les variables inconnues [8].

II.4.2.3. Méthodes par filtrage

Ces méthodes sont très utilisées pour les systèmes linéaires afin d'éliminer l'effet des bruits des mesures et des perturbations hautes fréquences sur les résidus, généralement utilisées ces dernières années pour le diagnostic robuste des systèmes linéaires.

Dans les approches basées sur le filtrage, le résidu est la différence entre une combinaison linéaire des sorties et des entrées et leur estimation respectives. La FDI robuste du filtrage a comme but de minimiser l'effet des perturbations sur résidu et maximiser l'effet des défauts sur le résidu [8].

II.4.2.4. Redondance physique et analytique

a) Redondance physique

Le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance a trois permettre notamment d'isoler un capteur défaillant. Ce que montre l'avantage de la méthode par la redondance physique, dont est conceptuellement simple, mais cette méthode souffre des désavantages qui limitent son application [7] :

- Doubler ou tripler le nombre de capteur revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liées à l'installation et à la maintenance de ces capteurs. Elle est par conséquent, utilisée uniquement pour la surveillance des sous-ensembles critiques d'un système.
- Les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps.

b) Redondance analytique

Cette redondance fait appel à des modèles analytiques représentatifs des relations de causalité et aux autres contraintes existantes entre les signaux présents dans le système. Les mesures obtenues des différents capteurs occultent le système peuvent alors être reliées par ces modèles.

Les modèles analytiques étant une représentation mathématique des lois d'évolution des variables physiques du système y est décrite par un ensemble d'équations issues des lois de la physique. Le procédé ainsi modélisés ne suit pas souvent une telle représentation idéale, ceci est dû à la présence d'incertitude sur les paramètres du modèle, des modifications structurelles du système, des non-linéarités et finalement l'effet des perturbations et des bruits de mesure [7].

II.5. Comparaison entre les deux méthodes

Un grand avantage des approches à base de modèle par rapport aux approches de traitement de données, réside sur le fait que seule l'information du comportement normal du procédé est prise en compte par l'intermédiaire d'un modèle de référence.

Les méthodes de diagnostic à base de modèle présentent aussi les avantages suivants :

- La connaissance sur le système est découplée de la connaissance du diagnostic.
- Il s'agit d'une connaissance de conception plutôt que d'exploitation.
- Le coût du développement et de maintenance est moindre.
- Les modèles fournissent un support adéquat pour l'explication (la structure du système est explicitement représentée).

Par contre, et dans certains cas, il s'avère difficile ou parfois impossible de trouver le bon modèle mathématique pour un système réel, à cause des nombreuses reconfigurations intervenant dans le processus de la production ou de la complexité des phénomènes mis en jeu.

La solution dans ce cas est le recours à des méthodes qui ne nécessitent aucune connaissance approfondie du système. C'est à base de données qu'on résout le problème.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale un résumé sur les différentes méthodes de diagnostic et leurs principes d'applications. Les méthodes ont été présentées sont les méthodes à base de modèle. Le choix d'une de ces méthodes dépend de la connaissance du système, de la présence des capteurs et modèles qui permettent de suivre l'état réel du système.

Chapitre III:
Modélisation, Commande Et
Diagnostic Du Robot

III.1. Modélisation 3D du robot

L'objectif de notre projet repose sur la réalisation, la commande et le diagnostic d'un bras manipulateur, nous avons passés par une étape de conception et de dimensionnement des pièces du notre robot à l'aide de logiciel SolidWorks.

III.1.1. Présentation de logiciel SolidWorks

Le logiciel de CAO SolidWorks est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

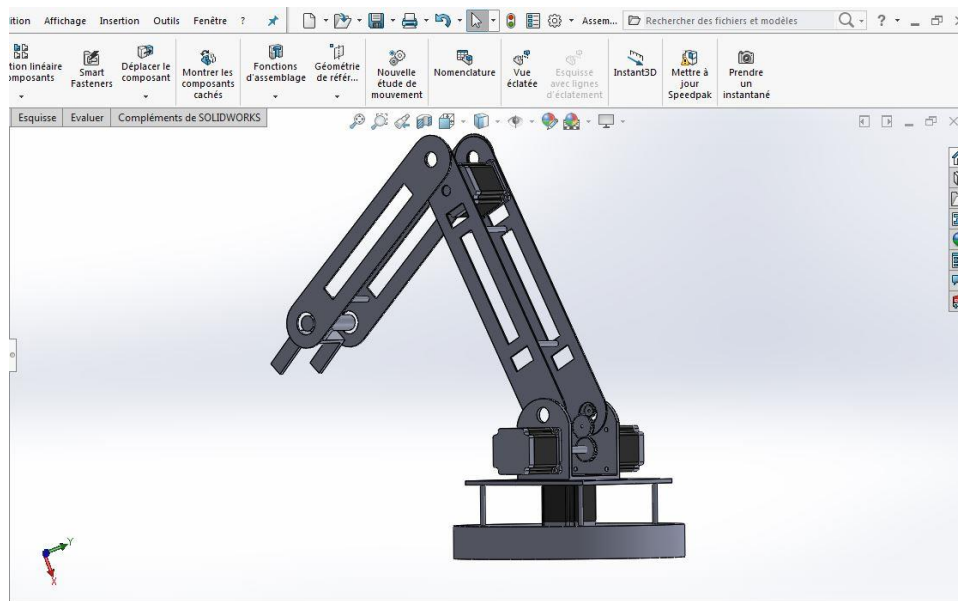


Figure III.1: Logiciel de conception mécanique 3D SolidWorks

Notre robot est de type anthropomorphe (structure 3R), elle consisté 4 corps : la base, le support de première articulation, deux segments et la pince, les pièces de robot sont de nature métallique (acier) fabrique par l'usinage.

Ce qui concerne la mécanique des solides, le robot pratique ses mouvements sur deux axes horizontaux et un axe vertical.

Pour les actionneurs on a utilisé des moteur pas à pas de NEMA17 et NEMA23, ainsi que on a utilisé deux capteurs de positions (un potentiomètre et un gyroscope) et un capteur de vitesse (capteur photoélectrique).

III.1.2. Création des composants

Dans cette partie on s'intéresse à la création des composants de notre robot. Il est composé de sept (5) corps et présente trois (3) degré de liberté.

- a) **La base:** C'est le support et l'origine de robot, pour notre robot elle consiste d'une pièce cylindrique comme un contre poids pour le robot (9 kg de poids et 220mm de diamètre), une pièce carrée (180 mm de longueur). On a utilisé des boulons pour la fixation (120 mm de longueur et 6mm de diamètre) ainsi qu'on a utilisé un roulement (30mm de diamètre extérieure) pour faciliter la rotation de la pièce qui fixé sur la base. Cette partie est supporté l'actionneur de première articulation (un moteur pas à pas unipolaire). cette partie est fixée.

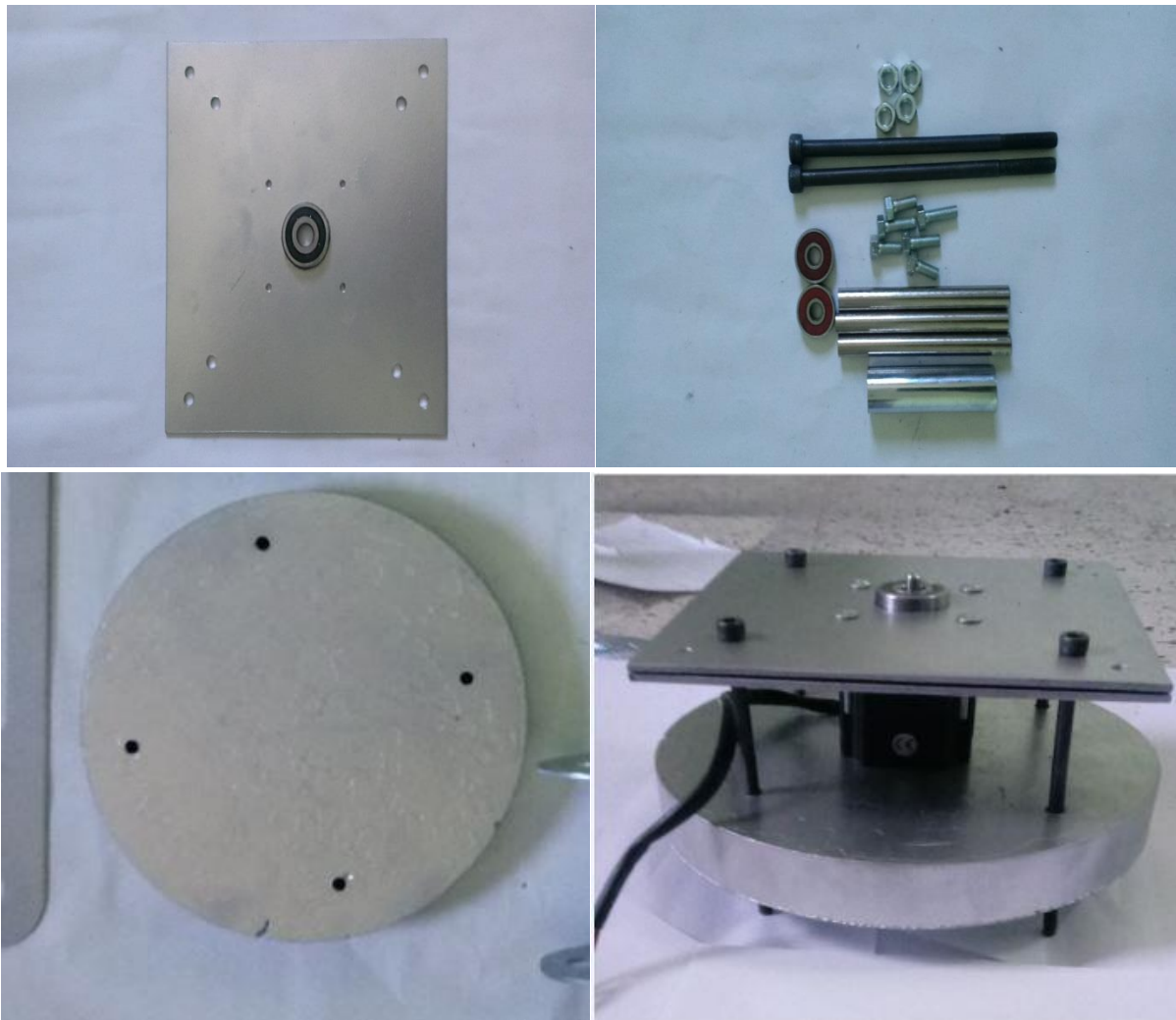


Figure III.2: Les composants de la base de notre robot

- b) **Porteur d'actionneur:** C'est une pièce de la forme 'U' pour l'emplacement du deuxième actionneur plus l'axe de rotation et le pignon pour la transformation de mouvement de l'actionneur vers le premier bras. Cette pièce est attachée à l'actionneur de la base.

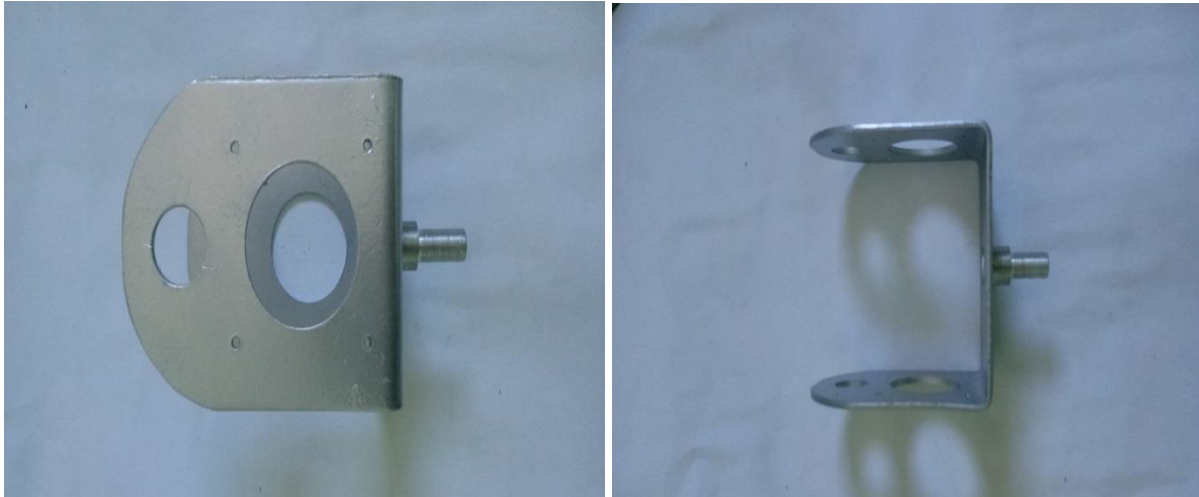


Figure III.3: Porteur d'actionneur

- c) **Le premier bras:** Il consiste de deux plaque parallèle de l'acier usiné (510mm de longueur, 60mm de largeur et 2 mm d'épaisseur) sont attaché entre eux par des tiges, plus le pignon. Ce bras est attaché à la pièce précédente par des roulements (19mm de diamètre extérieur) pour minimiser les frottements. Son poids est 0.772 kg.



Figure III.4: montage de premier bras

- d) **Le deuxième bras:** ce bras fabriqué de la même manière du bras précédent mais selon les démentions suivant (410mm de longueur, 60mm de largeur et 2 mm d'épaisseur). Son poids est 0.604 kg.



Figure III.5: montage de deuxième bras

- e) **L'organe terminal(OT):** dans notre robot cette partie est une pince pour ramener les objets.



Figure III.6: les éléments de fixation

III.2.La modélisation géométrique

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.

III.2.1. Le modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct permet de déterminer la position et l'orientation de l'organe terminal du manipulateur par rapport à un repère de référence en fonction des variables articulaires, le modèle s'écrit [12]:

$$X = f(q) \dots \text{ [III.a]}$$

Où

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbb{R}^n: \text{ Vecteur des variables articulaires.}$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^m: \text{ Vecteur des variables opérationnelles, } m \leq n.$$



Figure III.7: Modèle géométrique direct

La position de l'organe terminal peut être définie par des coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques. Le choix d'une structure particulière est guidé par les caractéristiques du robot, ainsi que par celle de la tâche à réaliser [13].

Pour calculer le modèle géométrique directe il existe deux méthodes : Méthode de Denavit-Hartenberg et la méthode de projection.

III.2.1.1. Méthode de Denavit-Hartenberg modifiée

Son principe consiste à fixer un repère à chaque corps de robot (R_0, R_1, \dots, R_n), chaque articulation j est bornée par deux repères R_{j-1} et R_j . le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants [14] :

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 .

r_j : Distance entre X_{j-1} et X_j le long de Z_j .

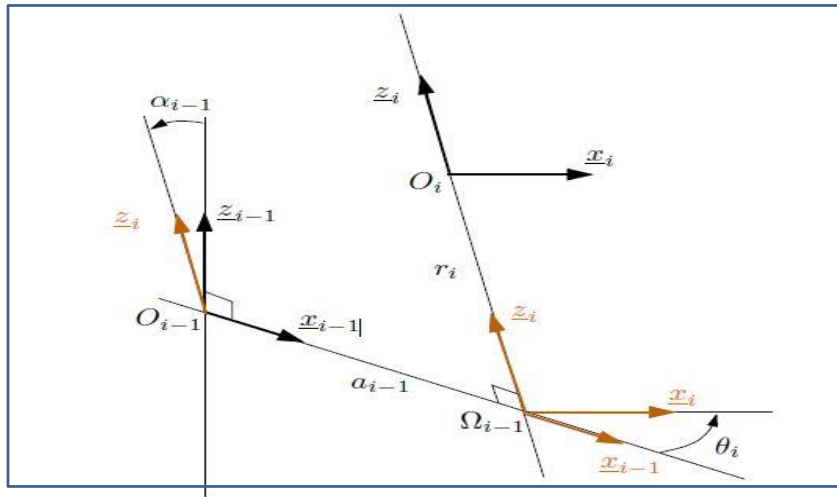


Figure III.8: Paramètres géométriques

A partir de ces paramètres, on calcule la matrice de passage ${}^{i-1}T_i$ entre chaque deux repères successives, qu'on l'appelle la matrice homogène.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & d_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & r_i \sin \theta_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \cos \theta_i \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & r_i \cos \theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On applique le théorème de D-H modifié sur notre robot pour déterminer le modèle géométrique direct.

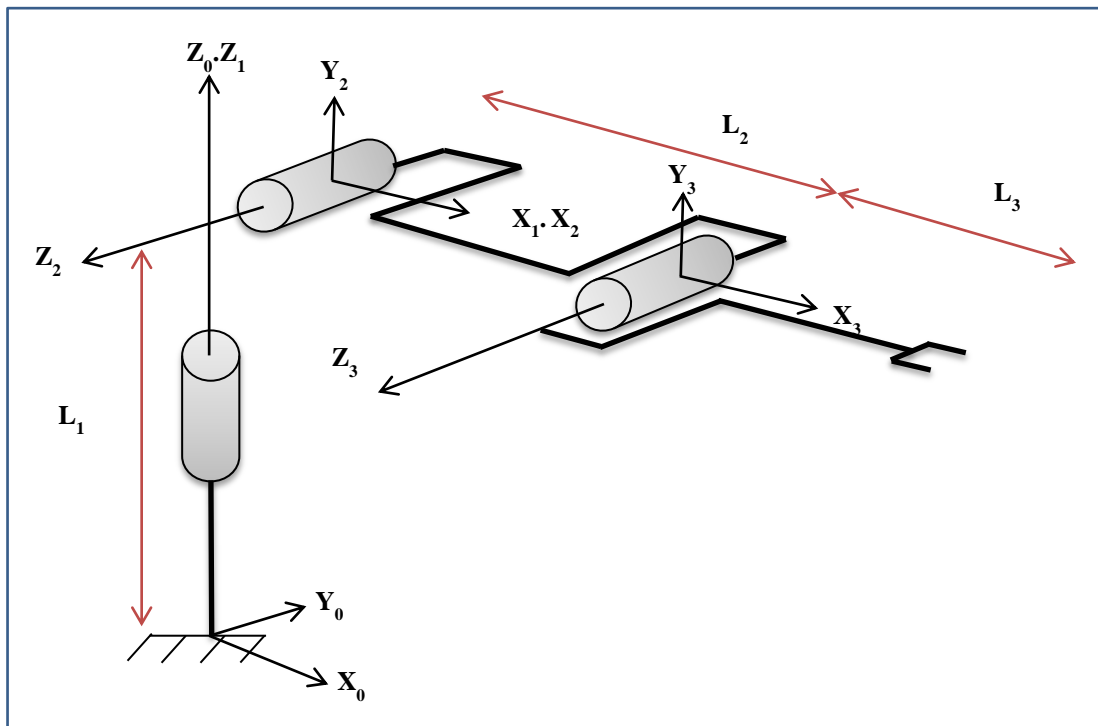


Figure III.9: repères du Robot

Tableau III.1: Paramètres géométriques

	θ_j	r_j	α_j	d_j
$R_0 - R_1$	θ_1	L_1	0	0
$R_1 - R_2$	θ_2	0	$\frac{\pi}{2}$	0
$R_2 - R_3$	θ_3	0	0	L_2

Le remplacement des paramètres entre chaque deux repères successives nous à donner Les matrices de passages suivantes :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Calcul de la matrice homogène 0T_3 :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- On calcule la matrice 1T_3

$${}^1T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- On calcule la matrice 0T_3

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Pour obtenu P_x, P_y et P_z on multiplie 0T_3 . $\begin{bmatrix} L_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 & L_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_2 \sin \theta_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1 \\ (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1 \\ L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Alors :

$$P_x = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1 \cdots \text{[III.1]}$$

$$P_y = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1 \cdots \text{[III.2]}$$

$$P_z = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdots \text{[III.3]}$$

III.2.1.2.la méthode de projection

Elle est très utilisé dans les cas des architectures simples .cette méthode consiste à projeter le modèle du robot sur un repère (x,y,z) .

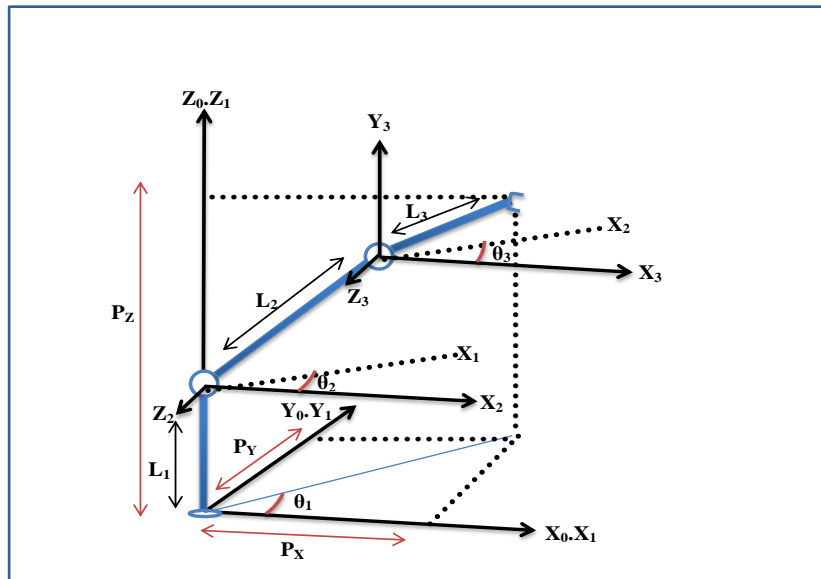


Figure III.10 : projection du robot

- Après la projection sur les axes (Ox, Oy et Oz) on trouve :

$$P_x = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1 \dots [\text{III.1}]$$

$$P_y = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1 \dots [\text{III.2}]$$

$$P_z = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dots [\text{III.3}]$$

III.2.2. Le modèle géométrique inverse (MGI) :

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles, le modèle s'écrit [12] :

$$q = f^I(X) \dots [\text{III.b}]$$



Figure III.11: Modèle géométrique inverse

- On calcule θ_1 :

$$\frac{P_y}{P_x} = \frac{(L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1}{(L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1} \Rightarrow \tan \theta_1 = \frac{P_y}{P_x} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x} \dots [\text{III.4}]$$

- On calcule θ_3 :

$$(P_x)^2 = ((L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1)^2$$

$$(P_y)^2 = ((L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1)^2$$

$$(P_x)^2 + (P_y)^2 = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3))^2 (\cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1) \dots \text{[III.5]}$$

- Après la relation mathématique suivante $(\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2) = 1$ on trouve :

$$(P_x)^2 + (P_y)^2 = L_2^2 \cos^2 \theta_2 + L_3^2 \cos^2(\theta_2 + \theta_3) + 2L_2 L_3 \cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$(P_z - L_1)^2 = L_2^2 \sin^2 \theta_2 + L_3^2 \sin^2(\theta_2 + \theta_3) + 2L_2 L_3 \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dots \text{[III.6]}$$

- D'après les équations [III.5] et [III.6] on trouve :

$$\text{[III.5]} + \text{[III.6]} \Rightarrow L_2^2 + L_3^2 + 2L_2 L_3 [\cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3)]$$

$$L_2^2 + L_3^2 + 2L_2 L_3 [\cos(\theta_2 - (\theta_2 - \theta_3))] = (1) + (2)$$

On a:

$$[\cos \theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3)] = \cos(\theta_2 - (\theta_2 - \theta_3))$$

Donc:

$$L_2^2 + L_3^2 + 2L_2 L_3 \cos \theta_3 = \text{[III.5]} + \text{[III.6]}$$

$$\cos \theta_3 = \frac{(P_z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2 + (P_x)^2 + (P_y)^2}{2L_2 L_3}$$

$$\Rightarrow \theta_3 = \cos^{-1} \frac{(P_z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2 + (P_x)^2 + (P_y)^2}{2L_2 L_3} \dots \text{[III.7]}$$

- On calcule θ_2 :

$$\frac{P_x}{\cos \theta_1} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\frac{P_x}{\cos \theta_1} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 (\cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3)$$

$$\frac{P_x}{\cos \theta_1} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - L_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3$$

$$\frac{P_x}{\cos \theta_1} = (L_2 + L_3 \cos \theta_3) \cos \theta_2 - L_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3$$

$$\frac{P_x}{\cos \theta_1} + L_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 = (L_2 + L_3 \cos \theta_3) \cos \theta_2$$

$$\Rightarrow \cos \theta_2 = \frac{\frac{P_x}{\cos \theta_1} + L_3 \sin \theta_3 \sin \theta_2}{L_2 + L_3 \cos \theta_3} \dots \text{[III.8]}$$

$$P_z - L_1 = L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$P_z - L_1 = L_2 \sin \theta_2 + L_3 (\sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_3 \cos \theta_2)$$

$$P_z - L_1 = (L_2 + L_3 \cos \theta_3) \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \cos \theta_2 \dots \text{[III. 9]}$$

- On remplace [III. 8] dans [III. 9] on trouve :

$$P_z - L_1 = (L_2 + L_3 \cos \theta_3) \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \left(\frac{\frac{P_x}{\cos \theta_1} + L_3 \sin \theta_3 \sin \theta_2}{L_2 + L_3 \cos \theta_3} \right)$$

$$P_z - L_1 = \frac{(L_2 + L_3 \cos \theta_3)^2 \sin \theta_2 + (L_3 \sin \theta_3)^2 \sin \theta_2 + (L_3 \sin \theta_3) \frac{P_x}{\cos \theta_1}}{L_2 + L_3 \cos \theta_3}$$

$$(P_z - L_1) (L_2 + L_3 \cos \theta_3) - \frac{P_x}{\cos \theta_1} (L_3 \sin \theta_3) = \sin \theta_2 ((L_2 + L_3 \cos \theta_3)^2 + L_3 \cos \theta_3)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{(P_z - L_1) (L_2 + L_3 \cos \theta_3) - \frac{P_x}{\cos \theta_1} (L_3 \sin \theta_3)}{(L_2 + L_3 \cos \theta_3)^2 + L_3 \cos \theta_3}$$

$$\Rightarrow \theta_2 = \sin^{-1} \frac{(P_z - L_1) (L_2 + L_3 \cos \theta_3) - \frac{P_x}{\cos \theta_1} (L_3 \sin \theta_3)}{(L_2 + L_3 \cos \theta_3)^2 + L_3 \cos \theta_3} \dots \text{[III. 10]}$$

III.3. Modélisation cinématique

III.3.1. modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct permet de déterminer la vitesse de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction de la vitesse des variables articulaires. Le modèle est décrit par l'équation [12] :

$$\dot{X} = J(q) \dot{q} \dots \text{[III.c]}$$

Où $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ est la matrice jacobéenne.

Pour calculer la matrice jacobéenne on utilise la méthode de dérivation du modèle géométrique direct (la méthode analytique):

$$J(q) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \theta_1} & & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_n} \end{pmatrix}$$

On a:

$$P_x = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3) \cos \theta_1 \dots [\text{III.1}]$$

$$P_y = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1 \dots [\text{III.2}]$$

$$P_z = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dots [\text{III.3}]$$

Après la dérivation on trouve :

$$J(q_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial P_z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \dots [\text{III.11}]$$

Avec:

$$\frac{\partial P_x}{\partial \theta_1} = -L_3 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 - L_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1$$

$$\frac{\partial P_x}{\partial \theta_2} = -L_3 \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1$$

$$\frac{\partial P_x}{\partial \theta_3} = -L_3 \dot{\theta}_3 \cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\frac{\partial P_y}{\partial \theta_1} = L_3 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 + L_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \cos \theta_1$$

$$\frac{\partial P_y}{\partial \theta_2} = -L_3 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 - L_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \sin \theta_1$$

$$\frac{\partial P_y}{\partial \theta_3} = -L_3 \dot{\theta}_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1$$

$$\frac{\partial P_z}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\frac{\partial P_z}{\partial \theta_2} = L_3 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

$$\frac{\partial P_z}{\partial \theta_3} = L_3 \dot{\theta}_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

III.3.2.modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, a partir d'une configuration \mathbf{q} donnée, les vitesses articulaires $\dot{\mathbf{q}}$ qui assurent au repère terminal une vitesse optimale $\dot{\mathbf{X}}$ imposée.

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix} = J(q_i) \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

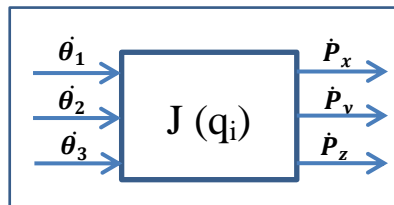


Figure III.12:Modèle cinématique direct

Alors :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = J(q_i)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix}$$

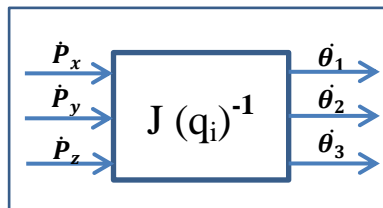


Figure III.13:Modèle cinématique inverse

On note :

$$J(q_i) = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ 0 & H & I \end{bmatrix} \dots \text{[III. 11]}$$

On calcule le déterminant Δ de $J(q_i)$:

$$\Delta = A[(E.I) - (H.F)] - B(D.I) + C(D.H)$$

Alors :

$$J(q_i)^T = \begin{bmatrix} A & D & 0 \\ B & E & H \\ C & F & I \end{bmatrix} \dots \text{[III. 12]}$$

Donc :

$$J(q_i)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A}{\Delta} & \frac{D}{\Delta} & 0 \\ \frac{B}{\Delta} & \frac{E}{\Delta} & \frac{H}{\Delta} \\ \frac{C}{\Delta} & \frac{F}{\Delta} & \frac{I}{\Delta} \end{bmatrix} \dots \text{[III.13]}$$

On trouve :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A}{\Delta} & \frac{D}{\Delta} & 0 \\ \frac{B}{\Delta} & \frac{E}{\Delta} & \frac{H}{\Delta} \\ \frac{C}{\Delta} & \frac{F}{\Delta} & \frac{I}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix}$$

III.4. Le moment d'inertie

Dans la partie suivante on va calculer l'inertie des segments de notre robot pour définir les couples et les contraintes mécaniques appliqués sur les actionneurs au niveau des articulations.

III. 4.1.Définition et principe

Le moment d'inertie est une grandeur physique qui caractérise la géométrie des masses d'un solide, c'est-à-dire la répartition de la matière en son sein. Il quantifie également la résistance à une mise en rotation de ce solide, et a pour dimension $M \cdot L^2$ (le produit d'une masse et du carré d'une longueur, qui s'exprime en $kg \cdot m^2$ dans le **S.I** [11]).

Principe : de façon générale, un moment d'inertie d'un solide **S** par rapport à un élément géométrique (point, droite ou plan) s'exprime par l'intégrale sur **S** d'une distance au carré affectée de la masse **dm**. La distance étant celle entre l'élément géométrique et le point courant **M** parcourant le solide **S**.

Ainsi, si **M(x,y,z)** est un point courant du repère orthonormé $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, la matrice d'inertie s'écrit comme suit :

$$J = \begin{bmatrix} J_{ox} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{xy} & J_{oy} & -J_{yz} \\ -J_{xz} & -J_{yz} & J_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz dm & - \int yz dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix}$$

Avec :

- J_{ox}, J_{oy} et J_{oz} sont les moments d'inertie par rapport aux axes \vec{Ox}, \vec{Oy} et \vec{Oz} .
- J_{xy}, J_{xz} et J_{yz} sont les moments d'inertie par rapport aux plans Oxy, Oxz et Oyz .

Dans notre cas, tous les mouvements sont par rapport à l'axe \vec{Oz} . Donc, on s'intéresse qu'à calculer les moments d'inertie suivant cet axe, ce qui vaut :

$$J_{oz} = \int (x^2 + y^2) dm$$

Avec :

- x et y : les distances suivant les axes \vec{Ox} et \vec{Oy} par rapport à l'axe de rotation \vec{Oz}
- dm : la masse infiniment petite de l'élément à intégrer

On savait que :

$$m = \rho V$$

Avec :

- m : masse Kg
- V : Volume m^3
- ρ : masse volumique Kg/m^3

Donc :
$$J_{oz} = \rho \int (x^2 + y^2) dV$$

Dans notre cas on va essayer de donner une proximité de calculs. On suppose que la forme des pièces du robot est standard et sont représenté comme des demi parallèles pipettes.

$$J_{pz} = \int (x^2 + y^2) dm$$

$$J_{pz} = \rho \int (x^2 + y^2) dV$$

$$J_{pz} = \rho \iiint_0^h (x^2 + y^2) dx dy dz$$

$$J_{pz} = \rho h \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-l/2}^{l/2} (x^2 + y^2) dx dy$$

$$J_{pz} = \rho h \left(\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-l/2}^{l/2} x^2 dx dy + \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-L/2}^{L/2} y^2 dy dx \right)$$

$$J_{pz} = \rho h \left(\int_{-L/2}^{L/2} \left[\frac{x^3}{3} \right] dy + \int_{-l/2}^{l/2} \left[\frac{x^3}{3} \right] dx \right)$$

$$J_{pz} = \rho h \left(\frac{L^3}{12} [y] + \frac{l^3}{12} [x] \right)$$

$$J_{pz} = \rho h \left(\frac{L^3 + l^2}{12} + \frac{l^3 + L^2}{12} \right) \text{ Donc : } J_{pz} = m \frac{L^2 + l^2}{12} \dots \text{ [III.29]}$$

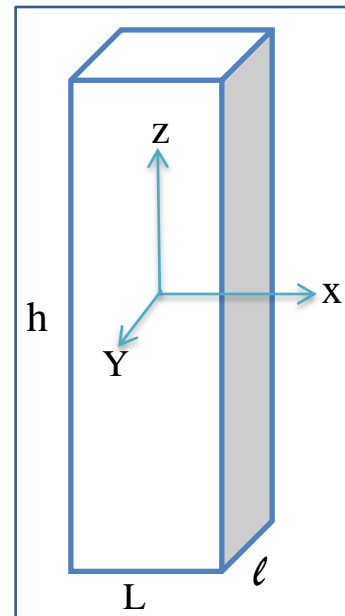


Figure III.14 : forme parallèle pipette

On applique les relations précédentes sur notre robot :

- Le support de la deuxième articulation par rapport l'axe $\overrightarrow{OZ_1}$:

$$m_1=0,426 \text{ kg}$$

$$L_1=0,097 \text{ m}$$

$$l_1 =0,080 \text{ m}$$

$$J_{Z_1} = 0,426 \frac{(0,097^2 + 0,08^2)}{12}$$

$$J_{Z_1} = (5,612195 \cdot 10^{-4})/2 \text{ Kg m}^2$$

$$J_{Z_1} = 2,8060975 \cdot 10^{-4} \text{ Kg m}^2$$

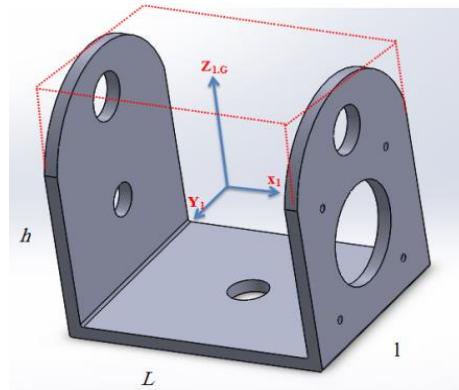


Figure III.15. Première articulation

Pour les deux bras (1) et (2): on considère aussi les deux pièces comme une demi parallèle pipette.

- On calcule l'inertie du premier bras :

On a:

$$m_2=0,772 \text{ kg}$$

$$L_2=0,51 \text{ m}$$

$$l_2 =0,060 \text{ m}$$

$$J_{Z_{2G}} = 0,772 \frac{(0,51^2 + 0,06^2)}{12}$$

$$J_{Z_{2G}} = (1,69647 \cdot 10^{-2})/2 \text{ Kg.m}^2$$

$$J_{Z_{2G}} =8,48235 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

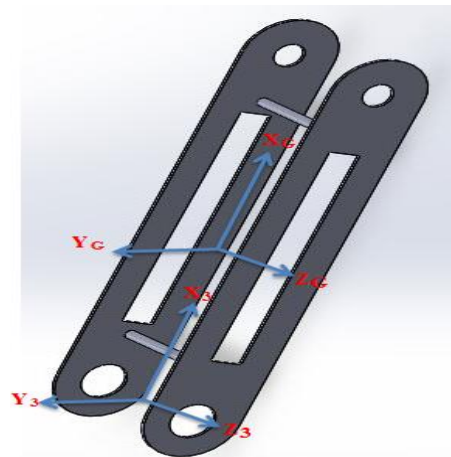


Figure III.16 Premier bras

La deuxième étape consiste à appliquer le théorème de transport ou (théorème de Huygens-Steiner).

Principe : Soit l'axe D passant par le centre de masse de l'objet, et un axe D' parallèle à D et distant de d.

$$\text{Alors : } \mathbf{J_{D'}} = \mathbf{J_D} + m \mathbf{d}^2$$

$$J_{Z_2} = J_{Z_{2G}} + m_2 \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 = 8,48235 \cdot 10^{-3} + 0,772 \left(\frac{0,51}{2}\right)^2 = 5,868165 \cdot 10^{-2} \text{ kg .m}^2$$

- Pour le deuxième bras On a :

$$m_3=0,604 \text{ kg}$$

$$L_3=0,41 \text{ m}$$

$$l_3=0,060 \text{ m}$$

$$J_{3ZG} = 0,604 \frac{(0,41^2 + 0,06^2)}{12}$$

$$J_{3ZG} = (8,64223 \cdot 10^{-3})/2 \text{ Kg.m}^2$$

$$J_{3ZG} = 4,321116 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

$$J_{Z3} = J_{3ZG} + m_3 \left(\frac{L_3}{2} \right)^2 = 4,3211 \cdot 10^{-3} + 0,604 \left(\frac{0,41}{2} \right)^2 = 2,97042 \cdot 10^{-2}$$

On calcule l'inertie de deuxième bras (masse m_3) par rapport l'axe $\overrightarrow{OZ_2}$. On détermine la distance L en fonction de θ_2 en utilisant le théorème d'Al-Kashi :

$$C^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \alpha$$

Avec:

$$c = L$$

$$a = L_2$$

$$b = \frac{L_3}{2}$$

$$\alpha = \pi + \theta_3$$

$$L^2 = L_2^2 + \left(\frac{L_3}{2} \right)^2 + L_2 L_3 \cos \theta_3 = (0,51^2 + \left(\frac{0,51}{2} \right)^2 + 0,51 * 0,41 \cos \theta_3)$$

$$L^2 = 0,325125 + 0,2091 \cos \theta_3$$

- On calcule l'inertie de les deux bras par à rapport au $\overrightarrow{OZ_2}$:

$$J_{Z2.3} = J_{3ZG} + J_{2ZG} + m_2 \left(\frac{L_2}{2} \right)^2 + (m_2 + m_3) L^2$$

$$J_{Z2.3} = J_{3ZG} + J_{2ZG} + m_2 \left(\frac{L_2}{2} \right)^2 + (m_2 + m_3) \left(L_2^2 + \left(\frac{L_2}{2} \right)^2 + L_2 L_3 \cos \theta_3 \right)$$

$$J_{z2.3} = (4,321116 + 8,48235)10^{-3} + 0,772 \left(\frac{0,51}{2} \right)^2 + (0,772 + 0,604)(0,51^2 + 0,325125 + 0,2091 \cos \theta_3) = 0,818073066 + 0,2877216 \cos \theta_3$$

$$J_{z2.3} = 0,818073066 + 0,2877216 \cos \theta_3 \text{ Kg.m}^2$$

III.5. Commande de robot

III.5.1. Commande des moteurs des articulations

Pour la commande des moteurs pas à pas on utilise le driver **L298N**. Ce circuit contient quinze (15) pins. Le circuit L298N est l'ensemble de quatre (4) circuit intégré, le L298 constitué de huit (8) transistors et huit portes logiques comme montre la figure III.18.

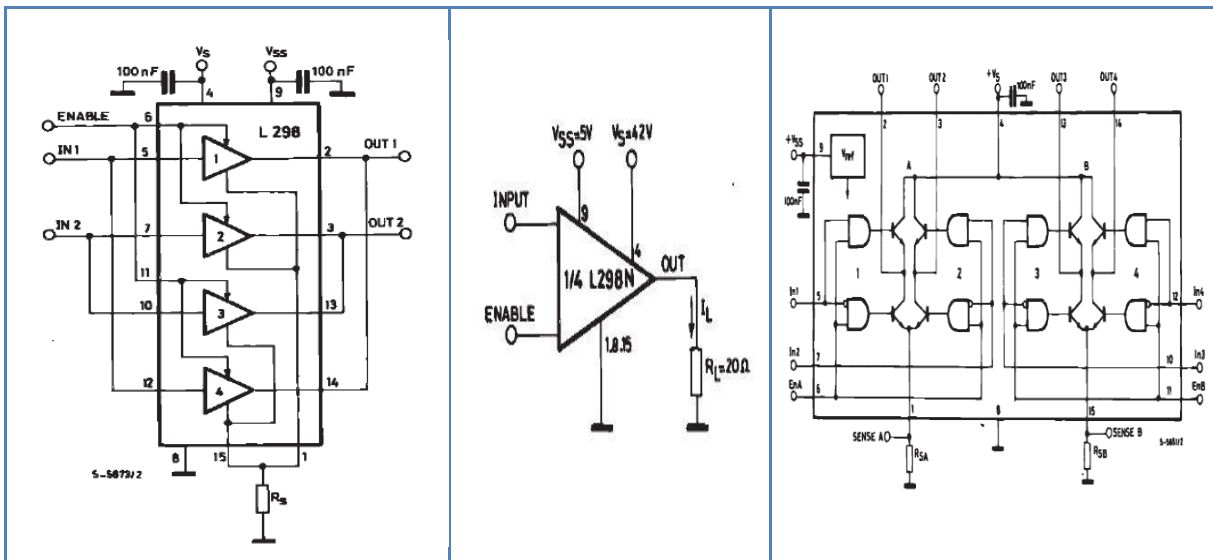


Figure III.17 : Le schéma électronique de driver L298N

Quand on utilise le circuit L298N en le placer comme suite: le pin 8 connectés avec le GND. Les pins 2, 3, 13 et 14 sont des sorties connectés avec les entrées du moteur, le pin 4 pour l'alimentation supplémentaire, les pins 5, 7, 10 et 12 sont des entrées connectés avec le microcontrôleur (arduino dans notre cas), les pins 6 et 11 pour activé le circuit, les pins 1 et 15 pour l'entrée du courant des phases A et B, le pin 9 connecté avec la tension de commande (3.3~5V) comme montre la figure III.19.

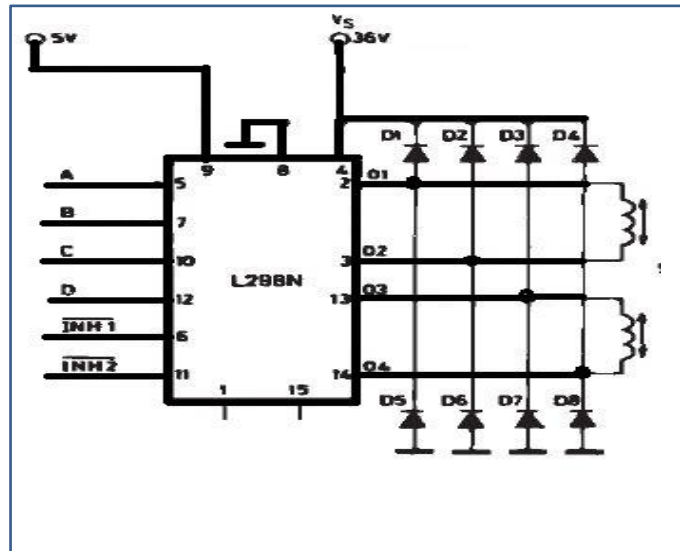


Figure III.18: schéma de commande du moteur pas à pas avec le L298N

III.5.2. Commande de robot en boucle ouverte

La commande de notre robot est en boucle ouverte car on a utilisé des moteur pas à pas, ces dernière sont pas besoin un retour d'information car sont très préciser.

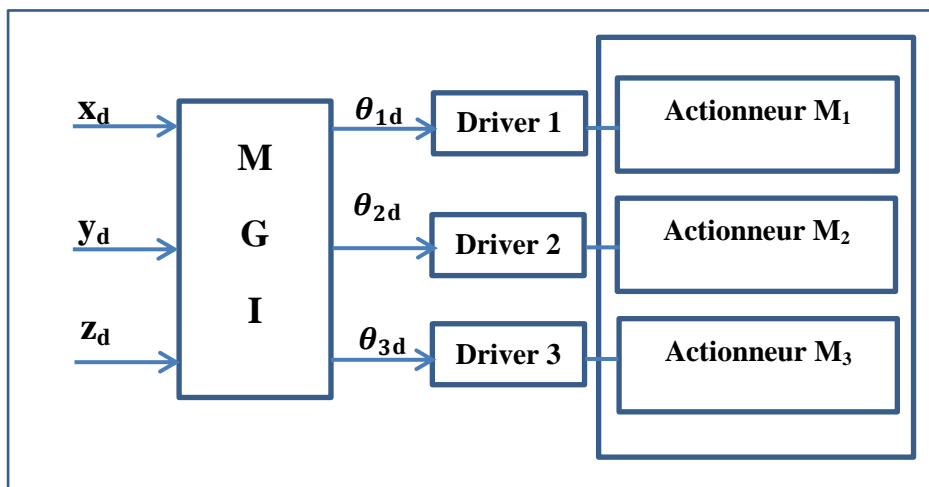


Figure III.19 : commande de robot en boucle ouverte

III.6. Modélisation du moteur pas à pas

Dans cette partie on s'intéresse aux équations de la modélisation de moteur pas à pas qu'on utilise dans notre robot. Ces équations sont deux parties : les équations de la partie électrique et de la partie mécanique.

a) les équations de la partie électrique :

$$\frac{di_A}{dt} = (v_A - Ri_A - e_A) / L$$

$$\frac{di_B}{dt} = (v_B - Ri_B - e_B) / L$$

b) les équations de la partie électrique :

$$\frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega / J$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Avec :

$$e_A = -K_m \omega \sin(N_r \theta)$$

$$e_B = K_m \omega \cos(N_r \theta)$$

$$T_e = -K_m \sin(N_r \theta) \left(i_A - \frac{e_A}{R_m} \right) + K_m \cos(N_r \theta) \left(i_B - \frac{e_B}{R_m} \right) - T_d \sin(4N_r \theta)$$

Les paramètres des équations du moteur :

- e_A et e_B : sont les forces de retour arrière induites dans les enroulements de phase A et B, respectivement.
- i_A et i_B : sont les courants d'enroulement des phases A et B.
- v_A et v_B : sont les tensions d'enroulement de phase A et B.
- K_m : est la constante de couple du moteur.
- N_r : est le nombre de dents sur chacun des deux pôles du rotor. Le paramètre Full step size est $(\pi / 2) / N_r$.
- R : est la résistance à l'enroulement.
- L : est l'inductance sinueuse.
- R_m : est la résistance magnétisante.
- B : est l'amortissement rotationnel.
- J : est l'inertie.
- ω : est la vitesse du rotor.
- θ : est l'angle du rotor.
- T_d : est l'amplitude du couple de détente.

Le tableau ci-dessus montre les valeurs des paramètres précédents

Tableau III.2. Spécifications des paramètres du Moteur pas à pas

	Tension	Courant/ Phase	Résistance/ Phase	Inductance/ Phase	Couple de maintien	Nombre de fils	Inertie Rotor	Poids	Couple
Unité	V	A	Ω	mH	Kg-cm		$g\text{-cm}^2$	kg	g-cm
NIMA 17	12	0.4	30	55	4.4	4	68	0.35	200
NIMA 23	24	2.8	9	2.5	12.6	4	300	0.72	400

III.6.1. Modèle Simulink du moteur pas à pas

On va utiliser MATLAB Simulink pour voir le comportement des variables suivant : le courant circuler dans les deux phases, la position $\theta(t)$ et la vitesse angulaire $\omega(t)$. La simulation des équations de moteur pas à pas dans MATLAB Simulink permet d'afficher les graphes des variables précédents.

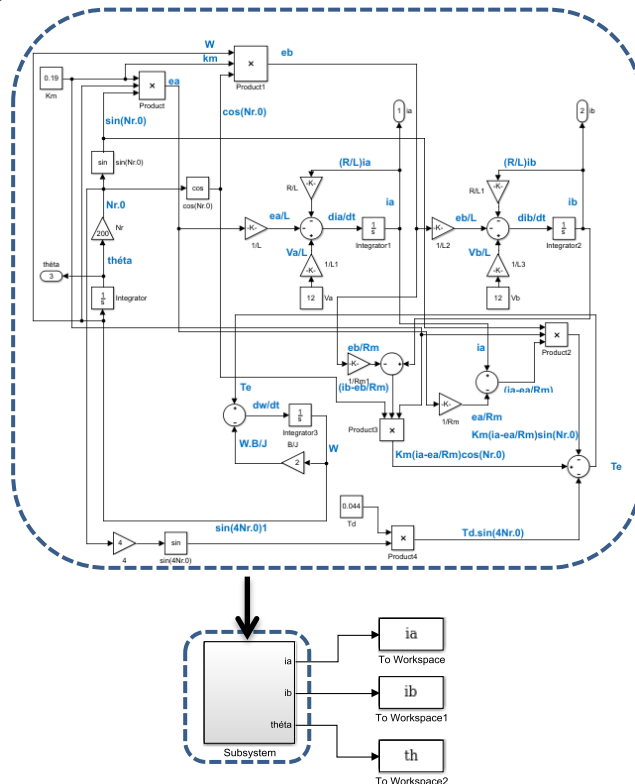


Figure III.20 : Schéma bloc du moteur pas à pas dans MATLAB Simulink

Les résultants de la simulation des équations dans donné par les graphes suivant :

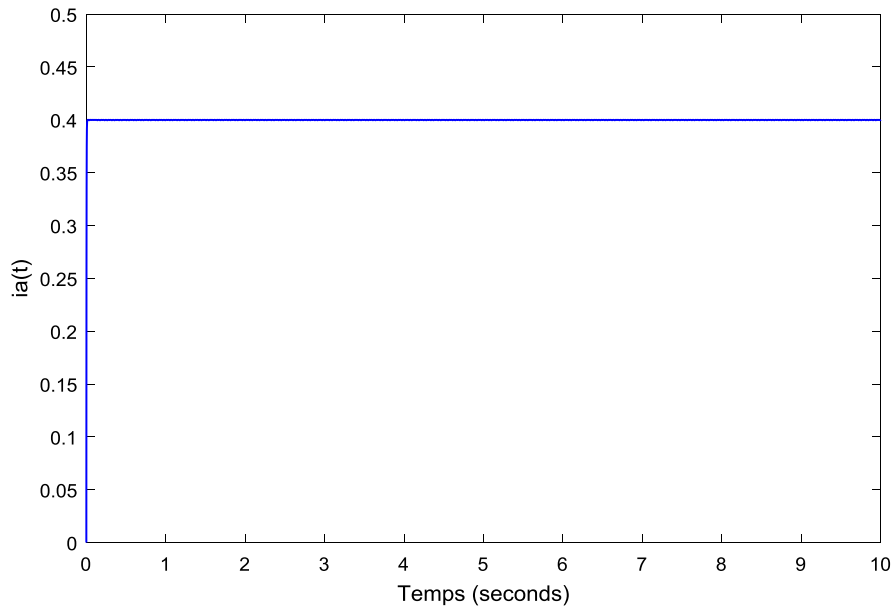


Figure III.21. Courant de la phase A (i_a)

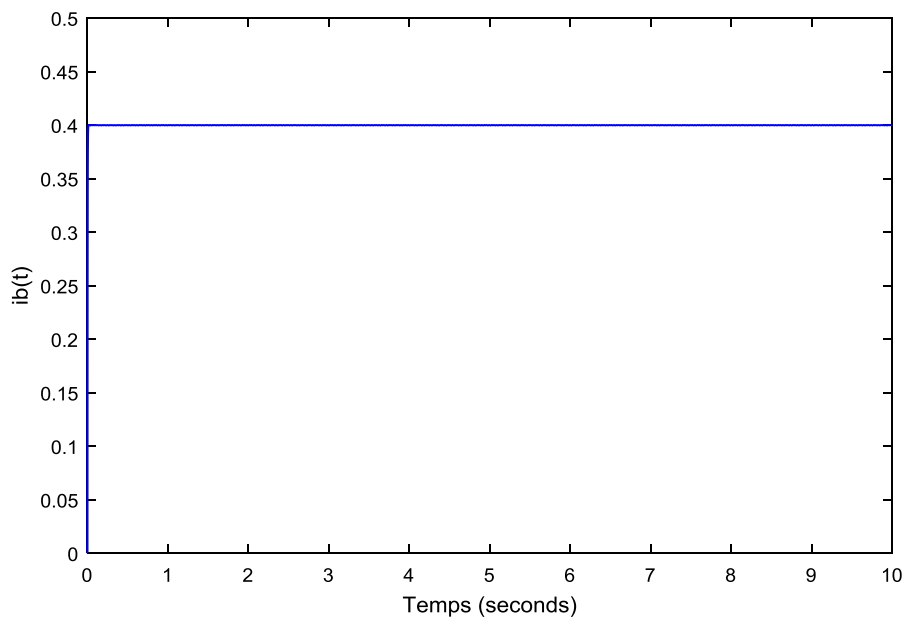


Figure III.22. Courant de la phase B (i_b)

On remarque que la valeur des courants $i(t)$ circulé dans les deux phases de moteur dans l'état normal est maximale, et égale à 0.4 A (Figure III.23 et III.24).

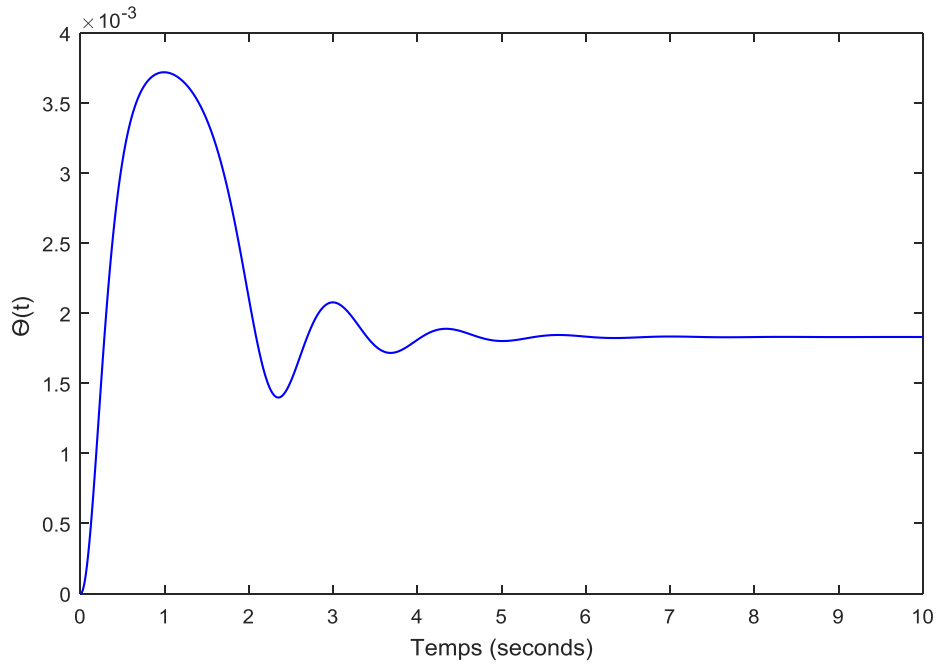


Figure III.23. La position $\theta(t)$ du moteur

La valeur de position $\theta(t)$ égale à 1e pas de moteur (1.8°) comme montre la figure III.25.

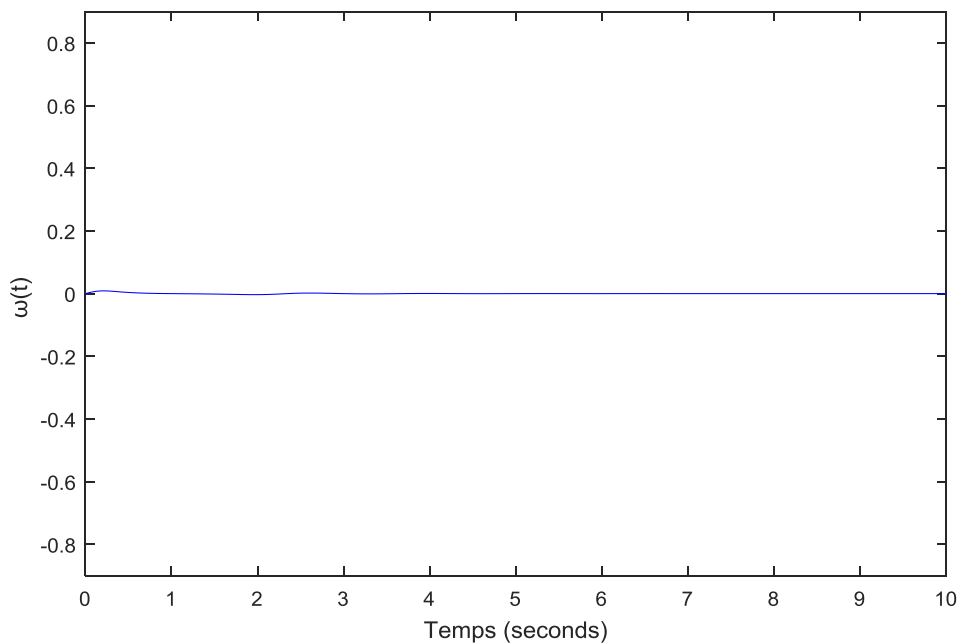


Figure III.24. La vitesse $\omega(t)$ du moteur

On remarque que la vitesse $\omega(t)$ est nulle car la position $\theta(t)$ est constante comme montre la figure III.26.

III.7. diagnostic du robot

Le rôle essentiel d'un système de diagnostic est de détecter et localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance grave du système.

La mise en œuvre de ce type de méthode contribue donc à la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de l'installation.

Le problème qui se pose en diagnostic est de pouvoir détecter et localiser un élément défaillant à partir de l'ensemble des connaissances disponibles sur l'installation.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'application de la redondance analytique sur les équations du moteur pas à pas.

III.7.1. Redondance analytique

Une relation de redondance analytique (RRA) est une relation analytique ne faisant intervenir que des variables connues.

III.7.1.1. Relations de la redondance analytique

$$L \frac{di_A}{dt} - v_A + Ri_A - K_m \omega \sin(N_r \theta) = 0 \dots [RRA. 1]$$

$$L \frac{di_B}{dt} - v_B + Ri_B + K_m \omega \cos(N_r \theta) = 0 \dots [RRA. 2]$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega - T_e = 0 \dots [RRA. 3]$$

Ces relations peuvent être utilisées pour générer la matrice de signature de défaut suivante :

Tableau III.3: La matrice de signature

	RRA. 1	RRA. 2	RRA. 3	Db	Ib
L_a	1	1	0	1	1
L_b	0	1	0	1	0
R_a	1	0	0	1	0
R_b	0	1	0	1	0
J	0	0	1	1	0
K_m	1	1	1	1	0
B	0	0	1	1	0
N	1	1	1	1	0
V_A	1	0	0	1	0
V_B	0	1	0	1	0
i_A	1	0	1	1	1
i_B	0	1	1	1	1
ω	1	1	1	1	0

Remarque : la même procédure prouvent être utiliser pour faire le diagnostic des autre moteurs.

Pour l'application de la partie diagnostic sur notre robot, on prend exemple le moteur de la première articulation, la figure ci-dessous représente le bloc Simulink de notre système de diagnostic

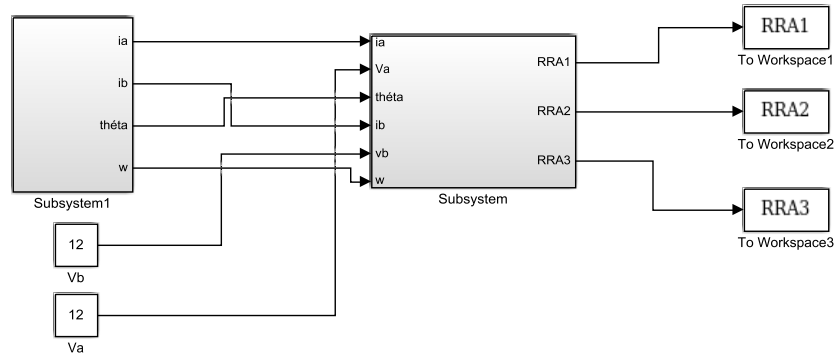


Figure III.25. Schéma bloc de système de diagnostic

III.7.2. Visualisation des résultants

Dans cette partie on va afficher les graphs des résidus avant et après l'injection des défauts dans les paramètres de l'actionneur.

III.7.2.1. Cas de bon fonctionnement (sans défaut)

Dans le cas de fonctionnement normal, on affiche les graphs avant l'injection des défauts, on lance donc la simulation et on aurait les résultats suivants :

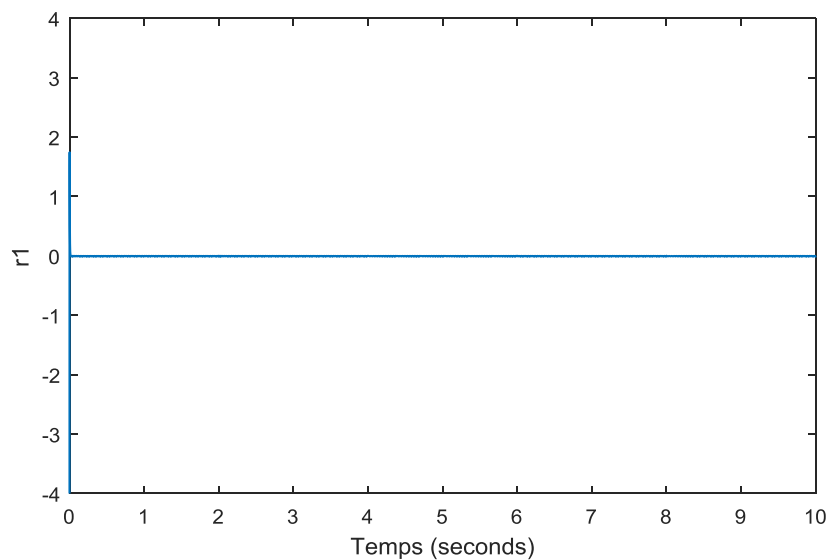


Figure III.26. Résidu 1 en temps réel

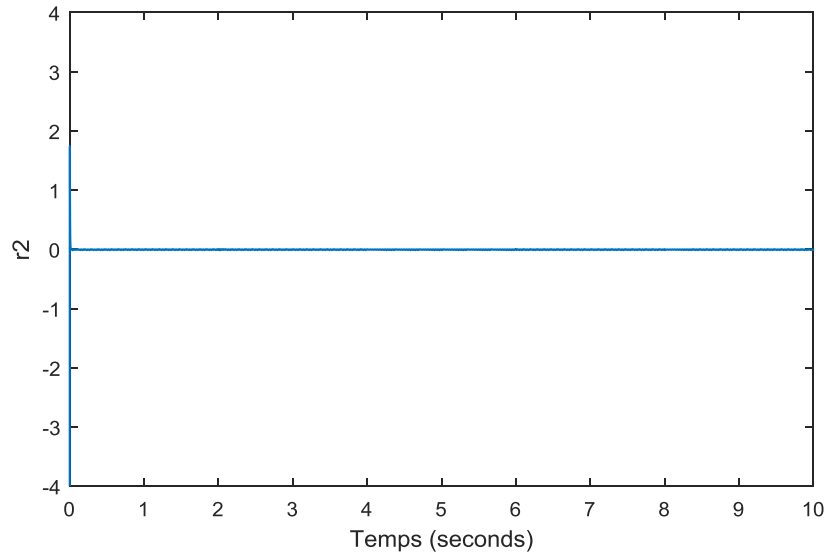


Figure III.27: résidu 2 en temps réel

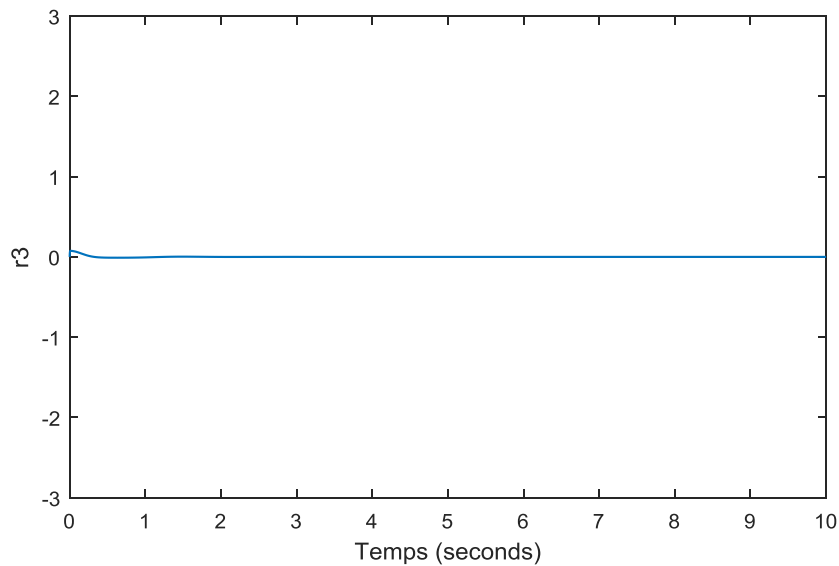


Figure III.28: résidu 3 en temps réel

Dans les cas de bon fonctionnement, on peut remarquer dans les figures III.28, III.29 et III.30 que les résidus sont nuls, donc notre système de détection ne signale aucun défaut.

III.7.2.2. Cas de fonctionnement défaillant

Dans cette partie nous créons un défaut au niveau de l'actionneur de la première articulation, on modifie les paramètres suivants : les courants (i_a) et (i_b) et la vitesse angulaire (ω).

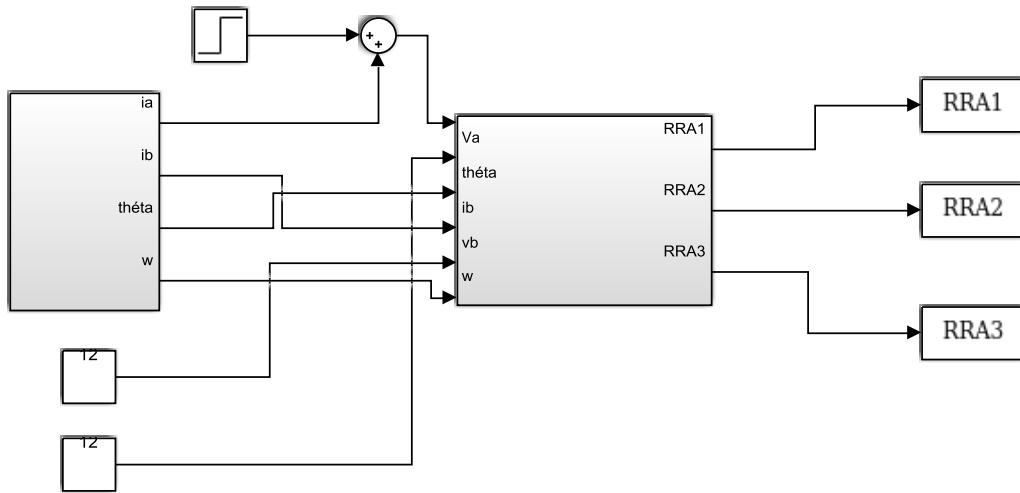


Figure III.29. Schéma bloc de système de diagnostic avec défaut

Les résultants après l'injection des défauts :

- Défaut de courant ia :

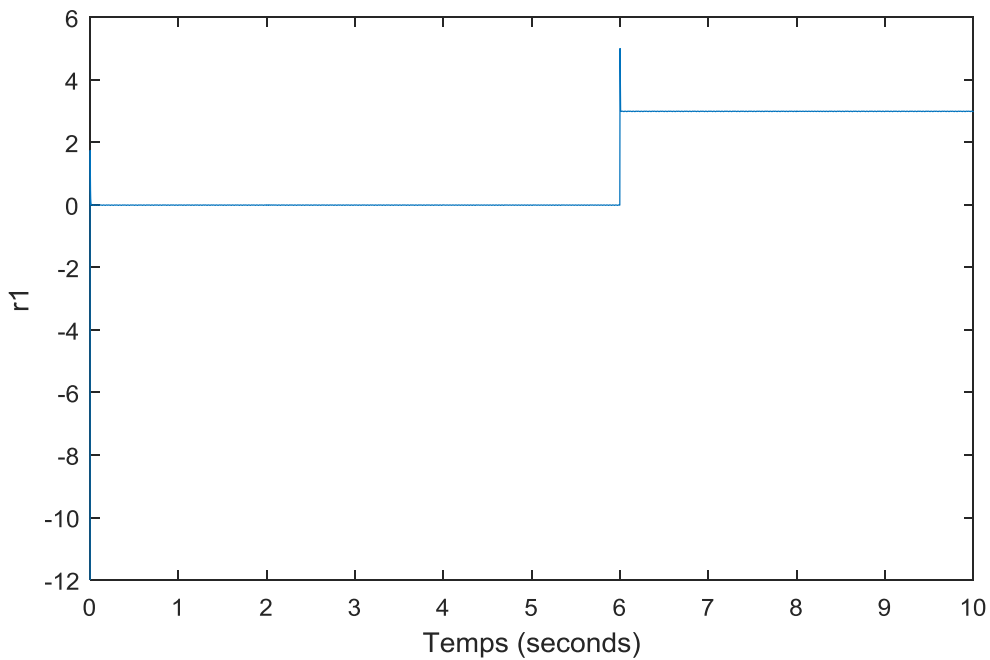


Figure III.30: résidu 1 en temps réel

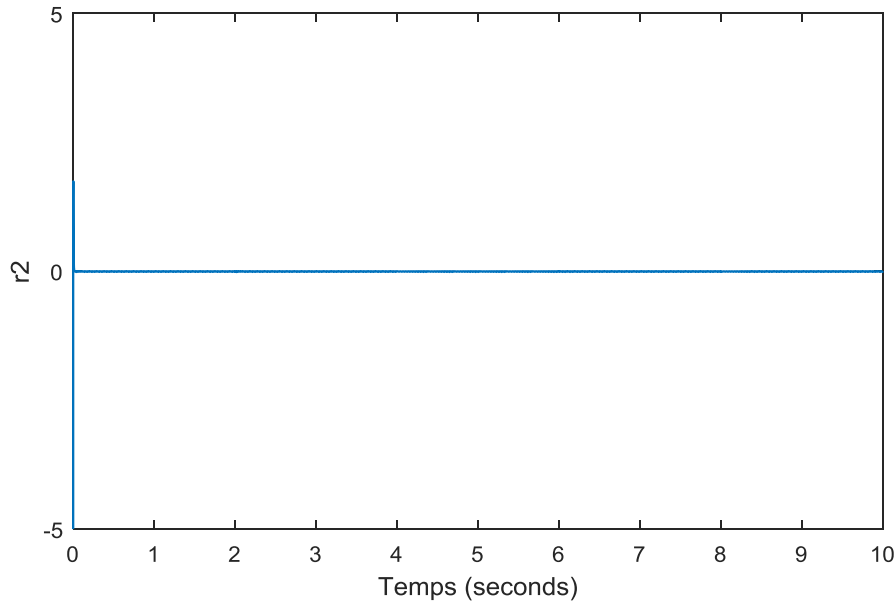


Figure III.31: résidu 2 en temps réel

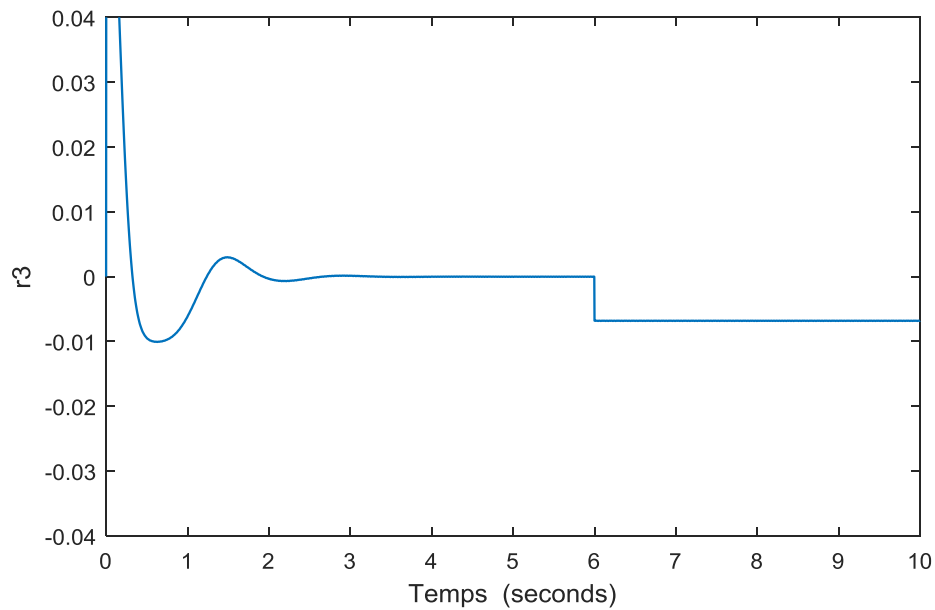


Figure III.32: résidu 3 en temps réel

A partir de la seconde ($t=5s$) on remarque que la valeur des résidus 1 et 3 change, ce qui veut dire que notre système de diagnostic a détecté un défaut dans la RRA1 et la RRA3 (figure III.31 et III.33), mais le résidu 2 est nul car le courant i_a n'appartient pas aux équations de RRA2 (figures III.32).

- Défaut du courant i_b :

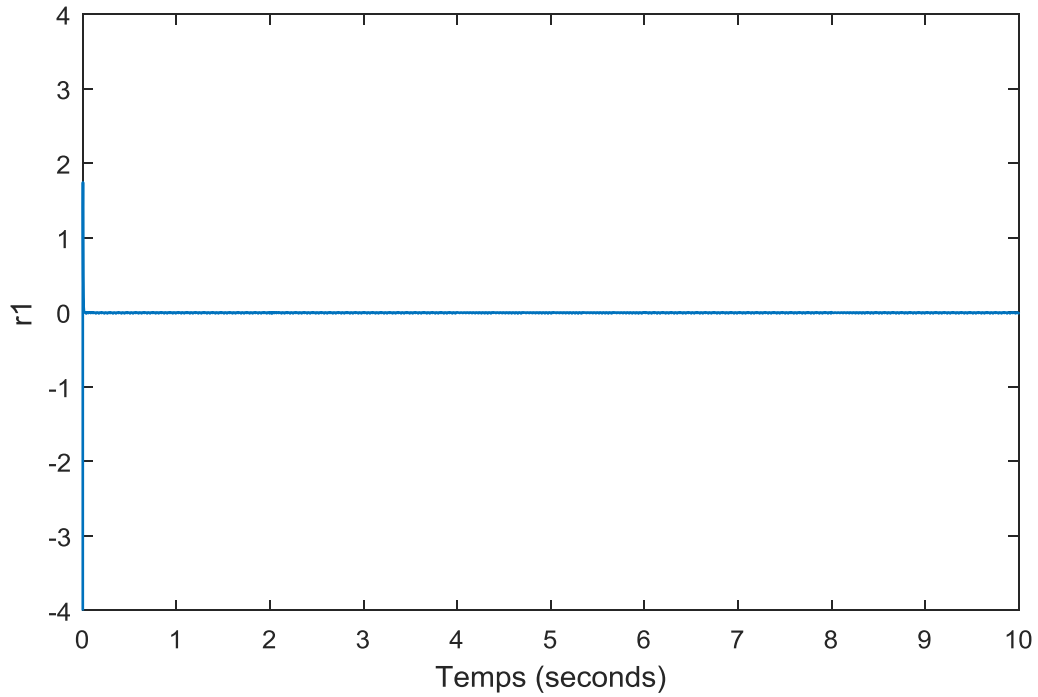


Figure III.33: résidu 1 en temps réel

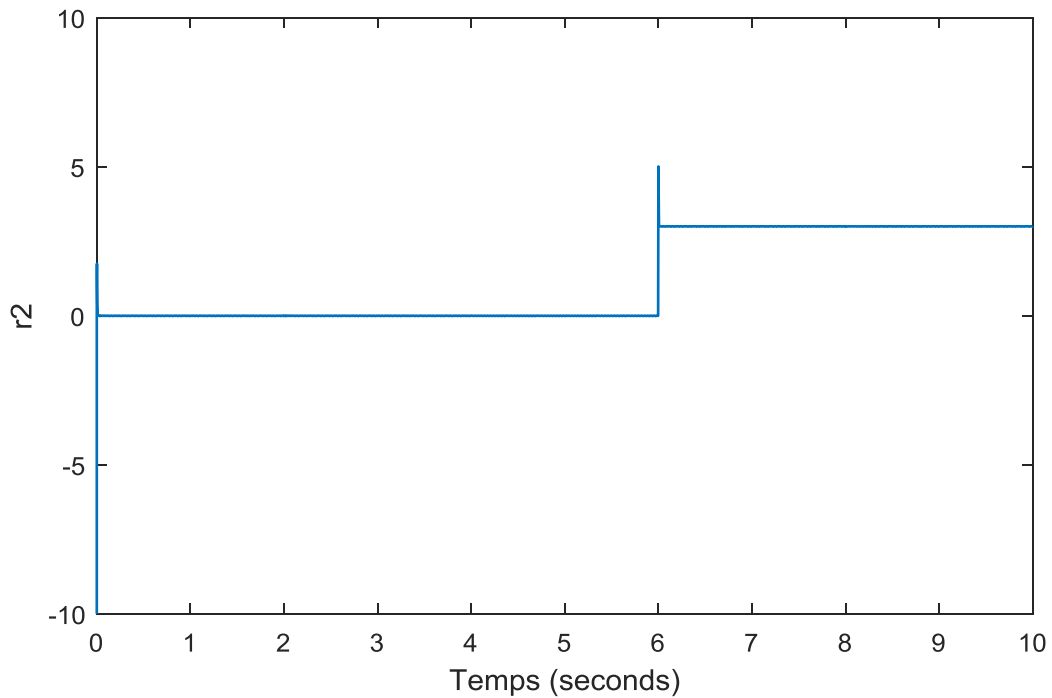


Figure III.34: résidu 2 en temps réel

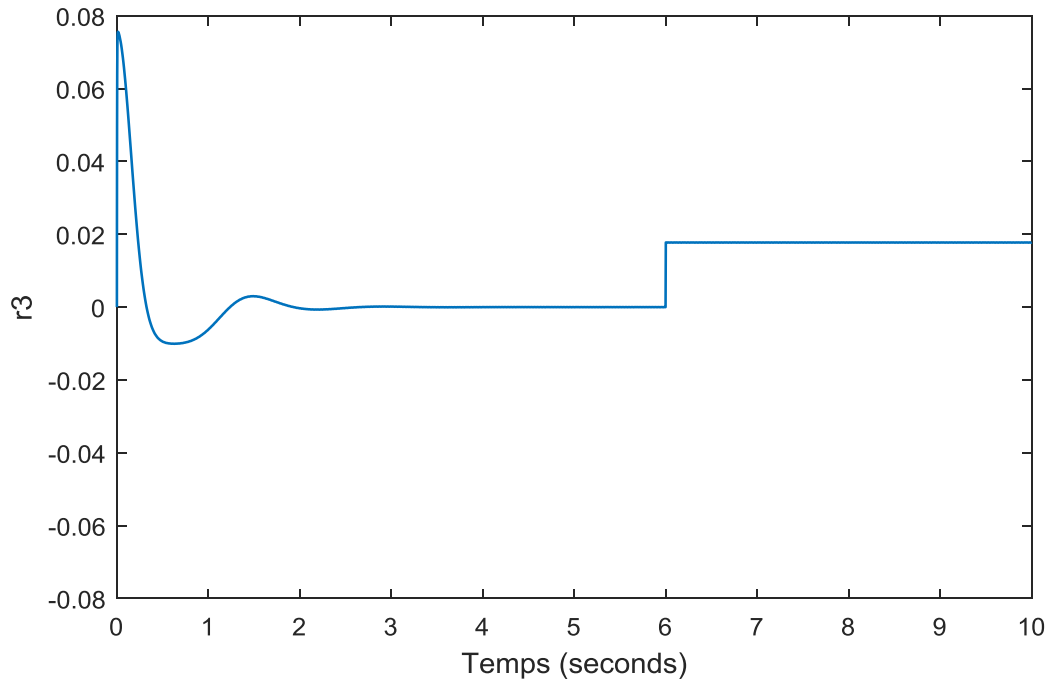


Figure III.35: résidu 3 en temps réel

A partir de la seconde ($t=6s$) on remarque que la valeur du résidu 2 change, Ainsi qu'à ($t=5s$) le résidu 3 change, ce qui veut dire que notre système de diagnostic a détecté un défaut dans la RRA2 et RRA3 (figure III.35 et figure III.36).

- Défaut de la vitesse angulaire(ω) :

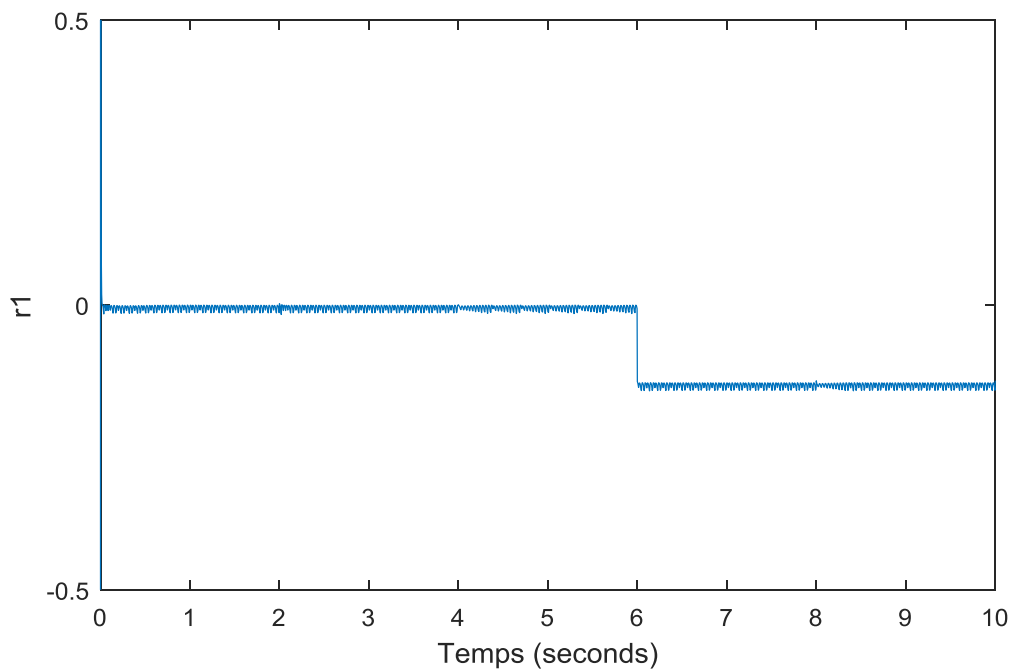


Figure III.36: résidu 1 en temps réel

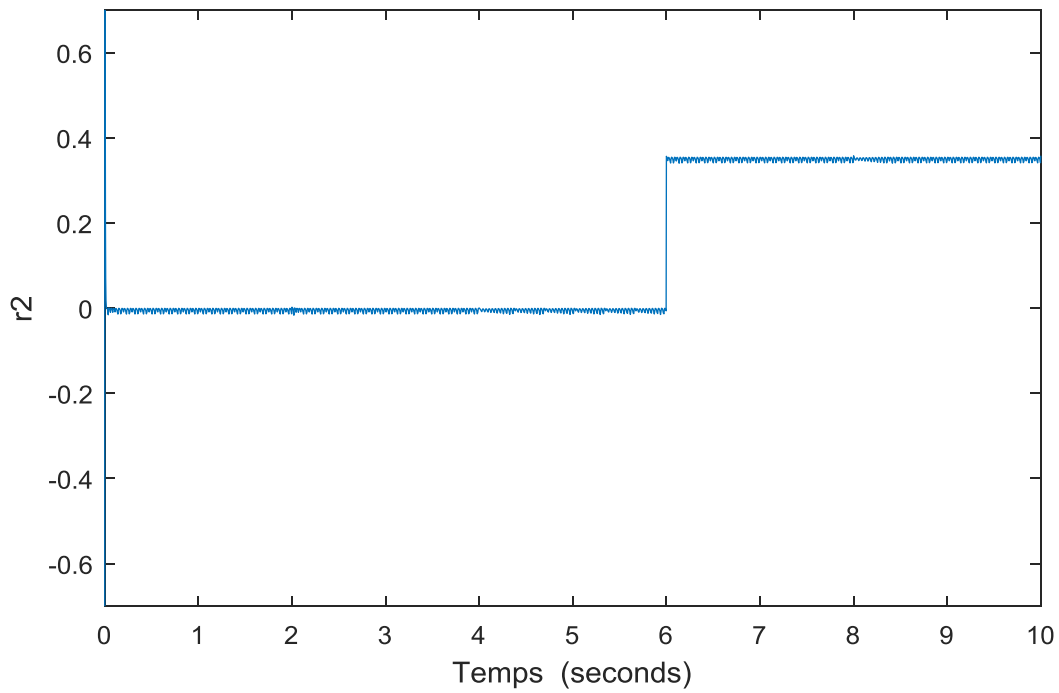


Figure III.37: résidu 2 en temps réel

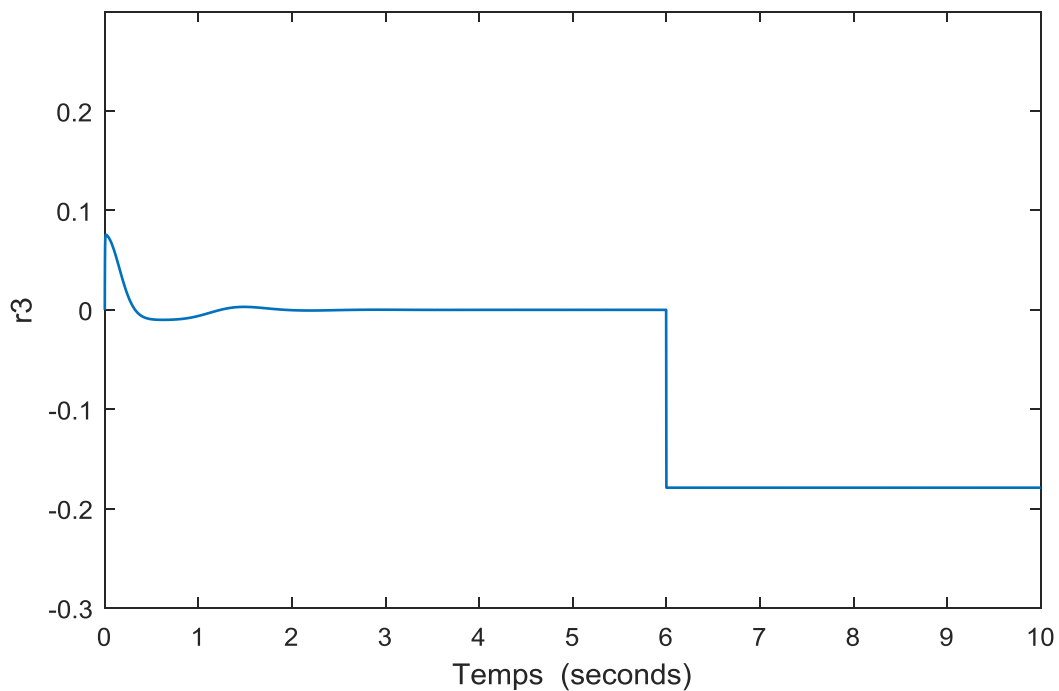


Figure III.38: résidu 3 en temps réel

A partir de la ($t=5s$) on remarque que la valeur des résidus 1, 2, et 3 change, donc que notre système de diagnostic a détecté un défaut dans la RRA1, la RRA2 et la RRA3 (figure III.40).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre travail d'une manière précisée, à partir de dimensionnement et modélisation des pièces du robot, passé par l'assemblage de ces pièce et mise en place les actionneurs de notre robot. Ainsi qu'on a présenté les composent essentiels de la partie commande de notre robot. Concernant la partie diagnostic, les relations de la redondance analytique nous permettent de détecter les défauts qui peuvent être influents sur les actionneurs de notre robot.

Conclusion
Générale

Conclusion

Ce mémoire de master présente la conception, la réalisation et le diagnostic d'un bras manipulateur à trois (3) degré de liberté, qui peut exécuter diverses combinaisons de mouvements grâce à l'utilisation de la commande par microcontrôleur de type arduino, qui assure une efficacité et facilité de commande.

Après avoir réalisé notre robot, nous pouvons conclure par des remarques et observations, ainsi que des complications rencontrées l'hors de la réalisation de celui-ci comme suite :

Indisponibilité des composants mécanique, ainsi que le manque de moyens technique pour les fabriqué. Ce qui a u une influence négative sur le paramètre de temps de réalisation.

Après avoir fabriqué les pièces mécaniques et entamée le montage du robot on a remarqué des défauts d'usinage sur le premier bras qui s'est exprimé par un décalage dans l'entraxe des pignons dont on a essayé de minimisé l'impact.

Ainsi que le cout des composants électronique disponible sur le marché algérien est très élevé.

Dans la deuxième partie on a appliqué une méthode de diagnostic dont s'est avérée la réussite, Cette méthode consiste l'application des relations de la redondance analytique et déterminer les résidus de ces relations.

Notre travail ouvre des perspectives de recherche intéressantes, en particulier au niveau du diagnostic de notre robot. Le travail qu'on va l'appliquer incarnée par la méthode de la redondance physique à l'aide d'un gyroscope. Le principe de l'idée est comme suite :

- l'emplacement d'un gyroscope au niveau de l'organe terminale et détermine leurs ongles d'orientation.
- comparaison entre les angles donnés par le gyroscope et les modèle géométrique inverse.

La comparaison entre l'information donnée par le gyroscope et celle calculer par le modèle géométrique inverse signifier que notre système ne détecte pas un défaut.

Bibliographie

- [1] : Ait Dahmane.K, Ait Ziane .M « Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API », Projet de fin d'étude, Université de Khemis Miliana (2015).
- [2] : BOUZIANE Fatima Zohra « Rétro-conception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible (Tlemcen)», Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen Option Ingénierie des systèmes mécaniques productives (2013)
- [3] : PRIEL MARC «les robots industriels: caractéristiques, performances et choix »: Edition AFNOR (1990)
- [4] : CHAAL Merouane, « Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte », Université Kasdi Merbah Ouargla, Option Maintenance Industrielle, (2013).
- [5] : SAADI Ramzy, SALHI Nassereddine, « Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un pc », Université Mohamed Khider Biskra Option micro-informatique et instrumentation, (2010)
- [6] : Lootsma T, F, « Observer- based Fault Detection and Isolation for nonlinear Systems » These de PHD, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, (2001).
- [7] : IKNI Samir, « Diagnostic de Pannes et Commande Tolérante Aux Fautes D'un Robot Manipulateur Télé-Opéré », Université de Batna, Option Robotique, (2010).
- [8] : LAMRANI Samir, GOUDA Massinissa, « Détection, isolation et estimation des défauts par l'approche Bond Graph sur un mécanisme robotique », Université M'hamed Bougara Boumerdes, Option mécatronique, (2015).
- [9] : TOUATI Youcef, « Diagnostique Robuste et estimation de défauts à base de modèle Bond Graph », Lille (2012).
- [10] : Mohand Arab Djeziri, diagnostic des systèmes incertains par l'approche Bond Graph,E.C de Lille (2007).
- [11] : ROUIDJALI Bilal, OUELMOKHTAR Hand, « commande et diagnostic d'un robot manipulateur 'SCARA' », Université M'hamed Bougara Boumerdes, (2017).

[12] : AZOUI NAWAL, « Commande non linéaire d'un bras manipulateur », Université-Batna, Option robotique, (2009).

[13] : Y. BAAZI, "Etude d'un Manipulateur à 3 Degrés de Liberté Application à la Fonction de Préhenseur", thèse de magister, Institut d'électronique, Université de Batna, (2000).

[14] : W.KHALIL et E.DOMBRE, cours de robotique, « Bases de la modélisation et de la commande des manipulateurs de type série », (2012).

ملخص:

يتلخص العمل الذي قدمناه في هذه المذكرة في انجاز و التحكم في ذراع محرك ، تم تقسيم العمل على ثلاث مراحل: اولا تحديد الابعاد و تصميم القطع بالاستعانة على برنامج الرسم المدعم بالحاسوب ، ثانيا تصنيع القطع و تجميعها ، ثالثا التحكم في الذراع باستعمال بطاقة الاردوينو و بعض المستشعرات ، كما قمنا باخضاع النظام لعملية تشخيص للأعطال المحتمل وقوعها على مستوى محركات المفاصل و ذلك باستعمال علاقات التكرار التحليلي.

كلمات مفتاحية: ذراع ، مفصل ، محرك ، تشخيص ، التكرار التحليلي ، التحكم.

Abstract:

The main objective of our Project is to build and control a robotic arm. The work has been divided into three steps, we started by selecting the size and dimensions of the arm using SolidWorks Software, then we moved on to building and assembling the parts, after that we controlled the arm by using the Arduino UNO and Some sensors. We also passed the system through a diagnose operation in order to detect possible problems that may occur to the articulating actuators, using analytical redundancy.

Keywords: Arm, actuators, sensors, diagnosis, analytical redundancy, control.

Résumé :

L'objectif principal de notre projet est de construire et de contrôler un bras manipulateur. Le travail a été divisé en trois étapes, Nous avons commencé par le dimensionnement et la conception du bras à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks, ensuite nous avons construit et assemblé les pièces, après nous avons contrôlé le bras avec l'utilisation de la carte l'Arduino UNO et quelques capteurs. Nous avons également effectué une opération de diagnostic afin de détecter les problèmes qui peuvent survenir aux actionneurs des articulations par la méthode de redondance analytique.

Mots clés : bras manipulateur, articulations, actionneur, diagnostic, redondance analytique, commande.