

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : **Génie Electrique**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :
HAMDACHE Zine Eddine
TOUIL Farid

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **ELECTROMECHANIQUE**
Option : **Electromécanique**

Thème :

Réalisation et commande d'un bras robotique à quatre degrés de liberté

Devant le jury composé de :

DJEBIRI Mohamed	MAA	UAMOB	Président
TOUAFEK Mohamed Yaakoub	MAA	UAMOB	Encadreur
FEKIK Arezki	MAB	UAMOB	Examinateur
OUADFEL Ghania	Doctorante	UYFM	Examinatrice

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

On tient tout d'abord à remercier en premier lieu Allah, le tout puissant, de nous avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

On tient à exprimer à notre promoteur Dr. touafek yaacoub, notre profonde gratitude et toutes nos reconnaissances pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa patiente durant la période de l'encadrement.

Tous nos remerciements vont également aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur de juger ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenu de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos très chers parents que nous les aimons beaucoup.

Nos frères.

Nos sœurs.

Nos amis (es)

Notre promoteur Mr Touafek Mohammed Yakoub

Tous les étudiants promotion 2018/2019.

Zine Eddine et Farid

Table des matières

Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations.....	viii
Liste des symbols.....	ix
Résumé.....	x
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ROBOTS

I.1. Introduction	2
I.2. Définitions.....	2
I.2.1. Robotique.....	2
I.2.2. Robot	2
I.2.3. Robot industriel	2
I.2.4. Bras manipulateur.....	3
I.3. Histoire de la robotique	3
I.4. Types des robots.....	6
I.4.1. Robots mobiles	6
I.4.2. Robots manipulateurs	7
I.5. Composants d'un système robotique.....	7
I.5.1. Unité informationnelle.....	8
I.5.2. Unité opérationnelle.....	8
I.5.3. Structure mécanique articulée.....	8
I.6. Architecture des robots.....	10
I.6.1. Base	10
I.6.2. Porteur	10
I.6.3. Actionneur	12

I.6.4. Organe terminal	12
I.7. Classification des robots.....	12
I.7.1. Classification fonctionnelle	12
I.7.2. Classification géométrique	15
I.8. Caractéristiques d'un robot	17
I.9. Domaines d'application	17
I.9.1. Tâches simples.....	18
I.9.2. Tâches complexes.....	18
I.10. Conclusion.....	18

Chapitre II : DESCRIPTION MECANIQUE ET MODELISATION

II.1. Introduction.....	19
II.2. Description de la partie mécanique du bras manipulateur	19
II.2.1. Structure mécanique du bras	19
II.2.2. Bras manipulateur assemblé.....	21
II.2.3. Organes constitutifs d'un bras manipulateur.....	22
II.3. Modélisation de système.....	24
II.3.1. Modélisation du moteur électrique à courant continu	24
II.3.1.1. Equations	24
II.3.1.2. Transformée de la place.....	25
II.3.1.3. Calcule des fonctions de transferts partielles.....	25
II.3.2. Modélisation d'un bras manipulateur.....	27
II.3.2.1. Présentation du bras manipulateur	27
II.3.2.2. Notion de position	27
II.3.3. Modèle Géométrique direct	30
II.3.3.1. Paramètre de DENAVET- HARTENBERG (D-H)	30
II.3.3.2. Modélisation du bras manipulateur réalisé.....	31
II.3.3.3. Identification des paramètres de DH de BM1 réalisé.....	32

II.4. Conclusion	34
------------------------	----

CHAPITRE III : COMMANDE DU BRAS MANIPULATEUR, TESTS ET RESULTATS

III.1. Introduction	35
III.2. Hardware.....	35
III.2.1. Carte Arduino.....	35
III.2.1.1. Arduino Uno.....	35
III.2.2. Actionneurs (servomoteurs).....	37
III.2.2.1. Paramètres techniques des servomoteurs	38
III.2.3. Potentiomètres.....	38
III.2.4. Alimentation	39
III.2.5. Fils de connexion	39
III.2.6. Condensateurs	39
III.3. Software.....	40
III.3.1. Présentation du logiciel.....	40
III.3.1.1. Présentation du logiciel ISIS (Intelligent Schematic Input System)	40
III.3.1.2. Logiciel de programmation Arduino.....	42
III.3.2. Commande	43
III.3.2.1. Commande manuelle.....	43
III.3.2.1.2. Commande analogique des articulations	43
III.3.2.2. Commande Automatique.....	44
III.4. Résultats du test en temps réel.....	45
III.5. Interprétation des résultats.....	49
III.6. Conclusion	50
Conclusion général	51
Références bibliographiques.....	52

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ROBOTS

Fig.I.1. De gauche à droite : (a) horloge à l'eau de Clepsydre [6], (b) Théâtre de l'automate du héros d'Alexandrie, (c) Machines hydrauliques hydro-alimentées humanoïdes d'Al-Jazari	4
Fig.I.2. Robot Unimate.....	4
Fig.I.3. Robot PUMA	5
Fig.I.4. Estimation de l'approvisionnement annuel mondial en robots industriels	6
Fig.I.5. Robots mobiles.	6
Fig.I.6. Robot manipulateur..	7
Fig.I.7. Bras manipulateur parallèle..	7
Fig.I.8. Structure fonctionnelle d'un robot.....	7
Fig.I.9. Structure sérielle	9
Fig.I.10. Structure fermée.....	9
Fig.I.11. Architecture d'un robot.....	10
Fig.I.12. Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes	11
Fig.I.13. Représentation d'une articulation prismatique sus ses différentes formes.....	11
Fig.I.14. Manipulateur à commande manuelle.....	13
Fig.I.15. Manipulateur automatique	13
Fig.I.16. Robot programmable.	14
Fig.I.17. Robot intelligent	14
Fig. I.18. Structure d'un Robot cartésien.	15
Fig.I.19. Structure d'un robot cylindrique.....	15
Fig.I.20. Structure d'un robot sphérique	16
Fig.I.21. Structure d'un robot SCARA	16
Fig.I.22. Structure d'un robot 3R	17

Chapitre II : DESCRIPTION MECANIQUE ET MODELISATION

Fig.II.1. Pièces du bras manipulateur sous SolidWorks.....	19
Fig.II.2. Base du BM1.....	20
Fig.II.3. Arrière-bras, avant-bras et poignet du BM1.....	21
Fig.II.4. Pince du BM1.....	21

Fig.II.5. BM1 assemble.	22
Fig.II.6. Différents types d'engrenage.....	23
Fig.II.7. Représentation schématique du moteur CC.	24
Fig.II.8. Schéma bloc du moteur.	26
Fig.II.9. Asservissement en boucle fermé commandé par PID.	26
Fig.II.10. Coordonnées cartésiennes	28
Fig.II.11. Coordonnées polaires	28
Fig.II.12. Système de coordonnées cylindriques.....	29
Fig.II.13. Système de coordonnées sphérique.....	29
Fig.II.14. Placement des repères et notation du bras manipulateur.....	32

CHAPITRE III : COMMANDE DU BRAS MANIPULATEUR, TESTS ET RESULTATS

Fig.III.1. Arduino Uno	36
Fig.III. 2. Exemple de signal en position pour un servomoteur.	37
Fig.III.3. De gauche à droite : (a) servomoteur du type sSG90, (b) servomoteur du type MG996R.....	37
Fig.III.4. Potentiomètres 10 KOhm.....	38
Fig.III.5. Fils de connexion	39
Fig.III.6. Condensateurs.	40
Fig.III.7. Interface de Proteus.....	40
Fig.III.8. Organigramme des étapes de la saisie des schémas.....	41
Fig.III.9. Simulation de la commande manuelle et automatique du BM1.	42
Fig.III.10. Interface d'Arduino.....	43
Fig.III.11. Moniteur série de l'arduino.....	44
Fig.III.12. Variation de l'entrée analogique 1 de la première articulation en fonction de temps.	45
Fig.III.13. Variation de Thêta 1 de la première articulation (servomoteur 1) en fonction de temps.	45
Fig.III.14. Variation de l'entrée analogique 2 de la deuxième articulation en fonction de temps.	46
Fig.III.15. Variation de Thêta 2 de de la deuxième articulation (servomoteur 2) en fonction de temps.	46

Fig.III.16. Variation de l'entrée analogique3 de la troisième articulation en fonction de temps. 47

Fig.III.17. Variation de Thêta 3 de la troisième articulation (servomoteur 3) en fonction de temps. 47

Fig.III.18. Variation de l'entrée analogique 4 de la quatrième articulation en fonction de temps. 48

Fig.III.19. Variation de Theta4 de la quatrième articulation (servomoteur 4) en fonction de temps. 48

Liste des tableaux

Chapitre II : DESCRIPTION MECANIQUE ET MODELISATION

Tableau.II.1. Paramètres et valeurs du moteur CC.	27
Tableau.II.2. Caractéristiques techniques du BM1.	31
Tableau.II.3. Parametres de DENAVIT- HATENBERG du BM1	32

CHAPITRE III : COMMANDE DU BRAS MANIPULATEUR, TESTS ET RESULTATS

Tableau.III.1. Synthèse des caractéristiques d'Arduino	36
Tableau III.2. Paramètres techniques des servomoteurs utilisés	38

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
AFRI	Association Française de Robotique Industrielle
ASEA	Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget
BM1	Bras Manipulateur version 1
CC	Courant Continu
ddl	degrés de liberté
D-H	DENAVET- HARTENBERG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
IDE	Integrated Development Environment
ISIS	Intelligent Schematic Input System
ISO	International Standard Organization
LBR	Leicht Bau Roboter
LED	Light Emitting Diode
PPP	Trois liaisons prismatiques
PRP	Une liaison prismatique, une liaison rotoïde, une liaison prismatique
PUMA	Programmable Universal Machine for Assembly
PWM	Pulse Width Modulation
3R	Trois liaisons rotoïde
RPP	une liaison rotoïde et deux liaisons prismatiques
R.U.R	Rossum's Universal Robot
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SISO	Simple Input Simple Output
SMA	Structure Mécanique Articulée
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
I	Intensité du courant	[A]
V	Tension	[V]
R_a	Résistance électrique	[Ω]
L_a	Inductance électrique	H
w	Vitesse de l'arbre du moteur.	[tr/min]
C_{em}	Couple électromagnétique du moteur	[N.m]
ϕ	Flux magnétique	[Wb]
J	Moment d'inertie	[Kg.m ²]
f	Coefficient de frottement	[N. ms]
K	Constante de couple	[Nm/S]
f	Vitesse d'horloge	[Hz]

الملخص

قمنا من خلال مذكرة التخرج التي انجزناها، بدراسة و انجاز نموذج مناورة ذراع روبوت ذو اربع درجات للحرية. يتميز الروبوت ببنية مفصلية، تتحرك بواسطة السرفوموتور و تتحكم بها بطاقة أردوينو.

لقد استعملنا في هذا العمل نوعين من التحكم : الأول يدوي، و يقوم بالتحكم في المفاصل، انها مقاومة متغيرة. و الثاني تحكم اوتوماتيكي، مهمته يقوم بتسجيل مسار الحركة ثم يعيد قراءتها تلقائيا.

كما قمنا بإنشاء واجهة بيانات باستعمال برنامج أردوينو لتسهيل تحكم المستعمل لروبوت المناور.

الكلمات المفتاحية : ذراع مناور، أردوينو، مقاومة متغيرة، السرفوموتور.

Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude et à la réalisation du prototype d'un bras manipulateur robotique à 4 degrés de liberté. C'est une structure mécanique articulée, actionnée par des servomoteurs et commandée par la carte Arduino.

On a utilisé deux commandes : la première est la commande manuelle des articulations par les résistances variables et la deuxième c'est la commande automatique à base de l'enregistrement de trajectoire de mouvement bras manipulateur, après ça la lecture et la répétition autant de fois que nécessaire automatiquement.

On a également créé une Interface de données en utilisant le logiciel Arduino afin de faciliter l'utilisateur la commande du bras manipulateur.

Mots clés : Bras manipulateur, Arduino, résistances variables, Servomoteur.

Abstract

In this work, we are interested in the study and the realization of the prototype of a robotic manipulator arm with 4 degrees of freedom. It is an articulated mechanical structure, actuated by servomotors and controlled by the Arduino board

We used two commands: the first is the manual control of the joints by the variable resistors and the second is the automatic control based on the recording of the manipulator arm movement trajectory, after that the playing and repeating it as many times as necessary automatically

A Data Interface was also created using the Arduino software to facilitate the user's control of the manipulator arm.

Key words : manipulator arm, Arduino, variable resistors, Servomotor.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Le monde aujourd'hui connaît un grand développement où la robotique a marqué l'évolution du monde technologique à cause des multi techniques qui basent sur la technologie moderne et qui contient des circuits électromécaniques commandé par des organes de pilotage programmable pour améliorer le rendement dans plusieurs domaines : industriel, militaire, médicale...etc.

Notre domaine électromécanique est une combinaison entre les phénomènes électriques et mécaniques. Pour maîtriser ce domaine il faut d'abord connaître comment peut-on relier ces deux phénomènes, pour ce là nous sommes intéressés aux robots manipulateurs pour des applications en robotique industrielle où elle remplace les ouvriers dans les tâches pénibles, répétitives ou dangereuses (la peinture, le déplacement des objets, les microsoudures... etc.) [1]. Pour maitre en évidence cette technique il faut adopter comme thématique du présent projet de fin d'étude ; une réalisation pratique d'un circuit électrique dans le but de commander électriquement un bras robotique autour d'une carte arduino. Dans le but de réaliser cela nous avons réparti le plan de travail comme suit :

- Le premier chapitre donne un bref historique sur la robotique et les différents types de robots, il analyse aussi les différents constituants d'un robot manipulateur qui est l'objet de notre étude. L'objectif du premier chapitre est d'apporter quelques définitions de base et décrire les constituants technologiques d'un robot et enfin définir les principaux termes du domaine.

- Le deuxième chapitre est consacré au problème de la réalisation mécanique du bras manipulateur et à la modélisation en utilisant le modèle de DENAVIT-HATEMBERG.

- Le troisième chapitre concerne la description des différents softwares et hardware utilisés pour le développement de la carte de commande suivis par les tests effectués et les résultats obtenus.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LES
ROBOTS

I.1. Introduction :

La robotique est considérée comme un des grands axes de progrès scientifiques et techniques, elle consiste à l'automatisation de nombreux secteurs de l'activité humaine afin par exemple, d'augmenter la productivité dans les entreprises, stimuler la compétitivité entre eux et surtout pouvoir travailler dans des zones à haut risque (espace, démantèlement nucléaire, déminage ...etc.).

Le secteur d'activité des systèmes robotiques s'est élargi de façon importante en particulier dans le domaine médical, spatial, industriel, militaire et dans le domaine de l'agriculture.

Dans ce chapitre, nous donnons un bref historique sur l'évolution de la robotique industrielle et un aperçu non exhaustif sur les robots.

I.2. Définitions :

I.2.1. Robotique :

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

I.2.2. Robot :

Appareil automatique à plusieurs degrés de liberté capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable [3].

I.2.3. Robot industriel :

La définition que l'on donne actuellement au robot industriel diffère quelque peu selon les pays :

I.2.3.1. Institut robot américain :

Un robot est un manipulateur reprogrammable à fonctions multiples. Il est conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des instruments spécialisés suivant des trajectoires variables programmées, en vue d'accomplir des tâches très diverses [4].

I.2.3.2. Association japonaise de robotique industrielle :

Tout mécanisme permettant d'effectuer, en tout ou en partie, une tâche normalement réalisée par l'homme [4].

I.2.3.3. L'association française de robotique industrielle (AFRI) :

Un robot industriel est une machine formée de divers mécanismes comportant divers degrés de liberté, ayant souvent l'apparence d'un ou de plusieurs bras se terminant par un poignet capable de maintenir un outil, une pièce ou un instrument de contrôle. En particulier, son unité de contrôle doit contenir un système de mémorisation, il peut contenir un système de mémorisation, il peut parfois utiliser des accessoires sensitifs et adaptables qui tiennent compte de l'environnement et des circonstances. Ces machines, ayant un rôle pluridisciplinaire, sont généralement conçues pour effectuer des fonctions répétitives, mais sont adaptables à d'autres fonctions [4].

I.2.3.4. International standard organisation (ISO) :

Une machine formée par un mécanisme incluant plusieurs degrés de libertés, ayant souvent l'apparence d'un ou de plusieurs bras se terminant par un poignet capable de tenir des outils, des pièces ou un dispositif d'inspection [4].

I.2.4. Bras manipulateur :

C'est un système de positionnement robotisé où les forces agissant au niveau des articulations sont produites par des actionneurs. Ces derniers peuvent être de type électrique, hydraulique ou pneumatique.

I.3. Histoire de la robotique :

Depuis la nuit des temps, un des rêves essentiels de l'homme, c'est de créer une machine intelligente à son image. Ce rêve fait désormais partie de la réalité frappante de notre monde. Le concept du robot a été établi par de nombreuses réalisations historiques créatives, tel que : l'horloge à l'eau de Clepsydre introduite par les Babyloniens (1400 avant JC), le théâtre de l'automate du Héros d'Alexandrie (100 après JC), les machines hydrauliques hydro-alimentées et les humanoïdes d'Al-Jazari (1200), fig.I.1 et les nombreux designs ingénieux de Léonard de Vinci (1500). Néanmoins, l'émergence du robot physique a dû attendre l'avènement de ses technologies sous-jacentes au cours du XX^e siècle [5].

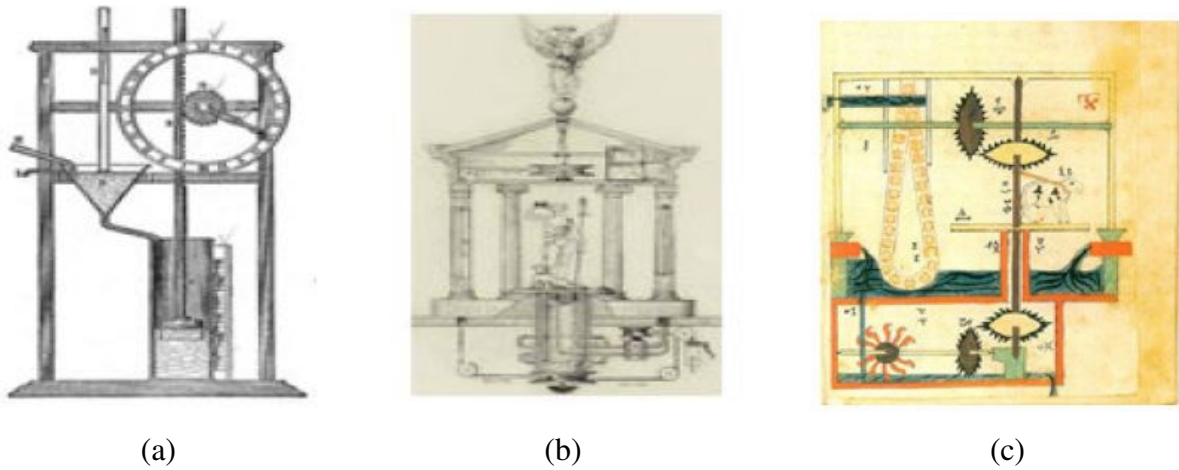


Fig.I.1. De gauche à droite : (a) horloge à l'eau de Clepsydre [6], (b) Théâtre de l'automate du héros d'Alexandrie [7], (c) Machines hydrauliques hydro-alimentées humanoïdes d'Al-Jazari. [8]

- En 1920 : Le mot robot dérivé du tchèque robota-travailleur, est venu dans la littérature scientifique et technique de la pièce de théâtre de l'écrivain Tchèque Karel Capek dans sa pièce de théâtre R.U.R. (Rossum's Universal Robot) [9].

- En 1959 : Le robot appelé Unimate, fig.I.2 est considéré comme le premier robot industriel. Unimate était un manipulateur avec des entraînements de pivot hydraulique, sa commande est réalisée au moyen d'une mémoire magnétique à tambour en coordonnées articulaires [10].



Fig.I.2. Robot Unimate. [11]

- En 1961 : l'utilisation du robot industriel Unimate, dans la production automobile, a commencé à General Motors [9].

- En 1973 : le nombre de robots installés dans le monde a atteint le 3000 [10].
- En 1973 : La Société Hitachi a développé le premier robot avec un système de traitement d'image pour des boulons de fixation à une forme mobile [10].
- 1974 : La société ASEA a livré les premiers robots tout-électriques, industriels contrôlés par microprocesseur [10].
- 1978 : la société Unimation a développé le robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly), le robot dans la figure ci-dessous il était l'un des robots les plus utilisés [10].



Fig.I.3. Robot PUMA. [12]

- En 1983 : le nombre des robots dans le monde a atteint 66 000 [10].
- En 2004 : la société Motomana a présenté un contrôleur du robot qui peut déplacer quatre robots synchronisés avec jusqu'à 38 axes [10].
- En 2006 : Avec le KUKA, le Centre allemand de l'aérospatiale (DLR) a développé la troisième génération de son robot léger (LBR). Il s'agit d'un bras anthropomorphe avec 7 articulations, chaque joint est équipé d'un capteur d'entraînement et d'un capteur d'angle côté sortie et d'un capteur de couple. La LBR est maintenant disponible commerce via KUKA [10].
- En 2015 : Les ventes de robots ont augmenté à 253 748 unités [13].

La figure ci-dessous montre les ventes des robots en fonction des années autour de monde :

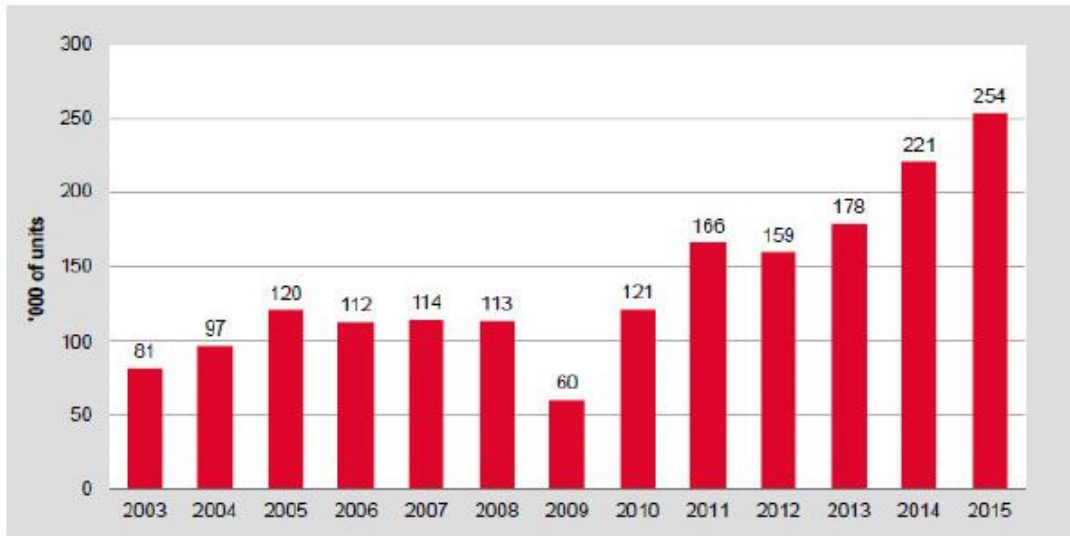


Fig.I.4. Estimation de l'approvisionnement annuel mondial en robots industriels. [13]

I.4. Types des robots :

Il existe deux types de robots : robots mobiles et robots manipulateurs [13].

I.4.1. Robots mobiles :

Ce sont des robots capables de se déplacer dans un environnement, Ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation (les robots explorateurs, les robots de services...) [14].

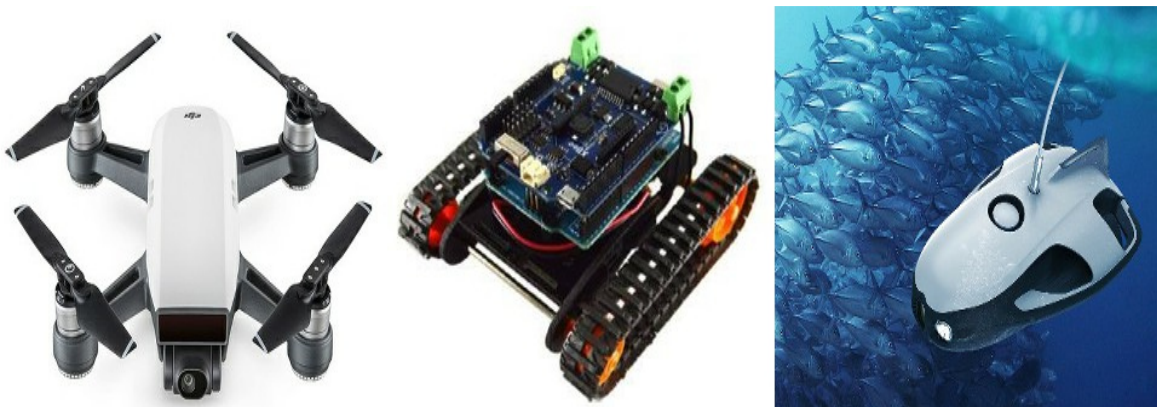


Fig.I.5. Robots mobiles. [14]

I.4.2. Robots manipulateurs :

C'est des robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise et répétitive.

Ce sont des manipulateurs automatiques programmés qui se substituent à l'homme pour l'accomplissement de tâches répétitives, (tels que les bras manipulateur, médicaux, les robots industriels...) [14] [16].



Fig.I.6. Robot manipulateur. [14]



Fig.I.7. Bras manipulateur parallèle. [16]

I.5. Composants d'un système robotique :

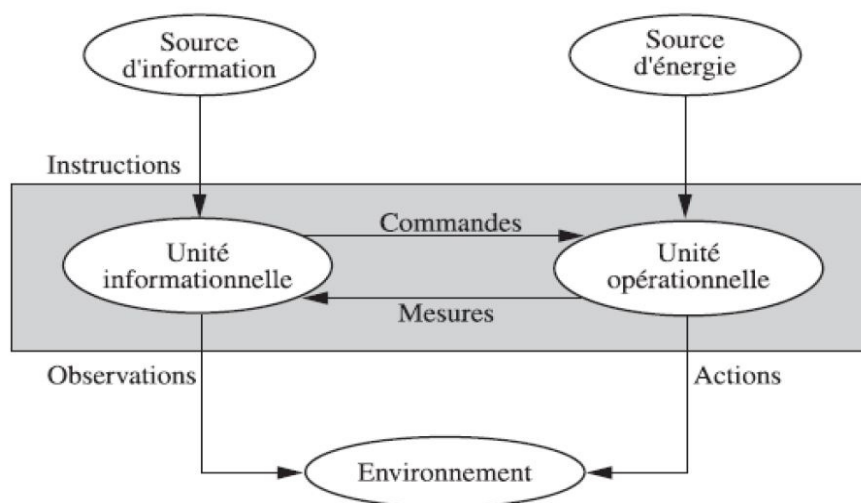


Fig.I.8. Structure fonctionnelle d'un robot [17].

I.5.1. 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 ces tâches. Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanente selon le cycle information-décision-action [17].

I.5.2. 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 [17].

I.5.3. Structure mécanique articulée :

Un robot manipulateur est constitué généralement de 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 (ddl) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide $C1$ par rapport au solide qui lui est directement relié $C2$.

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 lesquelles tous les corps ont aux 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 [18].

I.5.3.1. 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 d'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 [18].



Fig.I.9. Structure sérielle. [17]

I.5.3.2. Structure mécanique articulée à chaîne cinématiques fermée :

C'est une chaîne cinématique dont l'un des membres, différent de la base, possède un degré de connexion supérieur ou égal à trois [18].



Fig.I.10. Structure fermée. [17]

I.6. Architecture des robots :

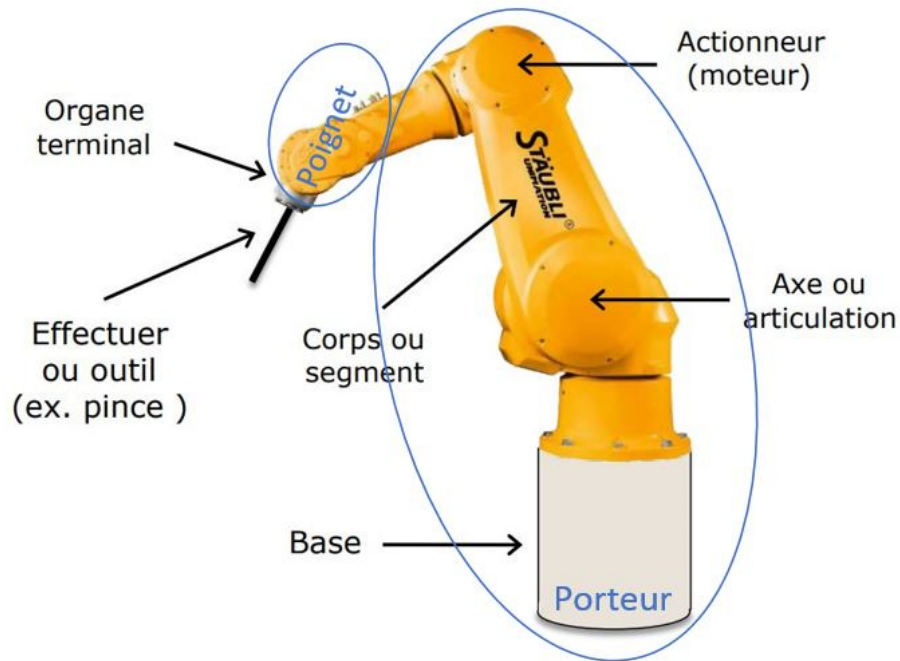


Fig.I.11. Architecture d'un robot. [14]

I.6.1. Base :

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels [19].

I.6.2. Porteur :

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé (segment, articulation, actionneur, organe terminal), il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation imposée. [19] Il est constitué de :

I.6.2.1. Segment :

Corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres [19].

I.6.2.2. Articulation :

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté, de l'un par rapport à l'autre [19].

I.6.2.2.1. 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 [20].

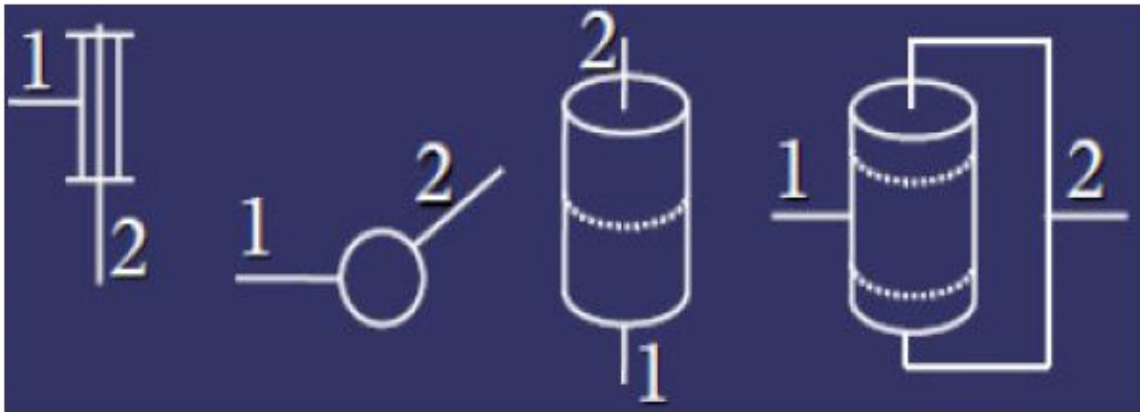


Fig.I.12. Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes [21].

I.6.2.2.2. 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 [21].

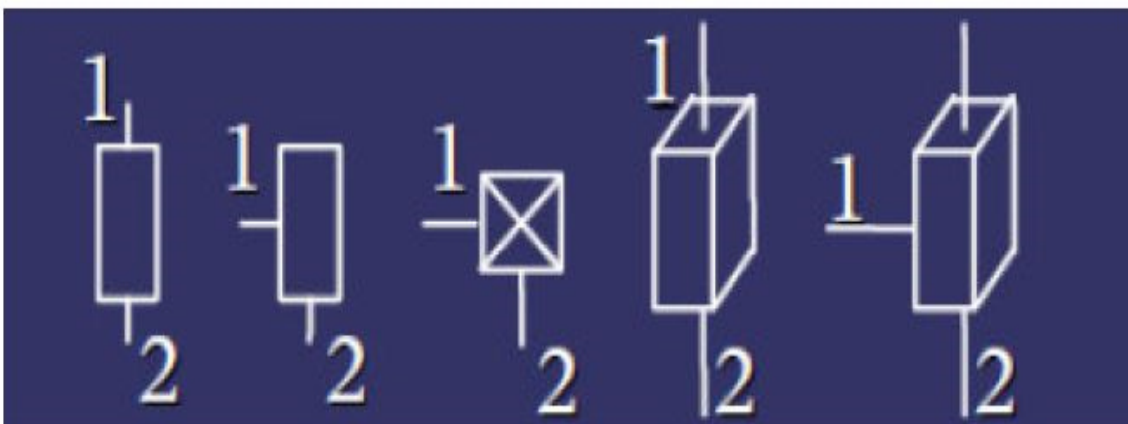


Fig.I.13. Représentation d'une articulation prismatique sous ses différentes formes. [21]

I.6.3. Actionneur :

Pour être animé, la structure mécanique articulée comporte des moteurs le plus souvent associés à des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs.

Ils utilisent fréquemment des moteurs. On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou pour de petits robots, des moteurs pas à pas.

Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). (Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien)).

Un manipulateur à cycles est une structure mécanique articulée avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).

I.6.4. Organe terminal :

Il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable.

I.7. Classification des robots :

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

I.7.1. Classification fonctionnelle :

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

I.7.1.1. Manipulateur à commande manuelle :

Cette figure représente les manipulateurs à commande manuelle :



Fig.I.14. Manipulateur à commande manuelle. [21]

I.7.1.2. Manipulateur automatique :

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



Fig.I.15. Manipulateur automatique. [22]

I.7.1.3. Robots programmables :

Ils répètent les mouvements qu'on leur a appris ou programmés sans informations sur l'environnement ou la tâche effectuée. On peut aussi faire la distinction entre robots « playback » qui reproduit la tâche apprise et robots à commande numérique qui peuvent être programmés hors-ligne.

Pour certains robots, par exemple les robots de peinture, qui doivent suivre une trajectoire complexe et difficile d'être exprimée mathématiquement, un opérateur humain spécialiste de la tâche effectue la trajectoire en guidant le bras du robot à l'aide d'un « pantin », et l'entièreté de la trajectoire est mémorisée par le robot [24].



Fig.I.16. Robot programmable. [23]

I.7.1.4. Robots intelligents :

On trouve actuellement des robots qui sont capables d'acquérir et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs d'efforts...) comme le montre la figure suivante les robots de troisième génération sont capables de comprendre un langage oral proche du langage naturel et de se débrouiller de façon autonome dans un environnement complexe grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle [24].



Fig.I.17. Robot intelligent. [25]

I.7.2. Classification géométrique :

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

I.7.2.1. Structure cartésienne (PPP) :

A trois liaisons prismatiques, est la plus ancienne historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure est relativement peu utilisée, sauf dans quelques applications particulières : robots pratiques, robots de magasinage, par exemple [17].



Fig. I.18. Structure d'un Robot cartésien. [19]

I.7.2.2. Structure cylindrique (RPP) ou (PRP) :

Associe une rotation et deux translations. Elle présente l'inconvénient d'offrir un volume de travail faible devant un encombrement total important. Elle n'est pratiquement plus utilisée [16].



Fig.I.19. Structure d'un robot cylindrique. [19]

I.7.2.3. Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale :

Est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structure cylindrique [17].



Fig.I.20. Structure d'un robot sphérique. [19]

I.7.2.4. Structure dite SCARA :

A axes de rotation parallèles est l'une des plus utilisées, en particulier pour des tâches de manutention ou d'assemblages très fréquents dans l'industrie. Ce succès commercial est lié au fait que le ratio entre le volume de travail et l'encombrement est très favorable et aussi que la structure SCARA est très adaptée à ce type de tâches [17].

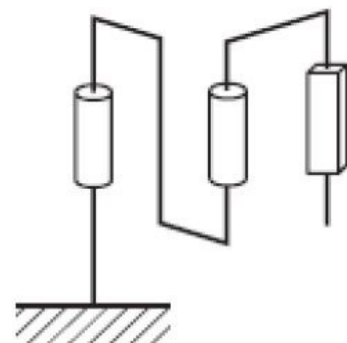


Fig.I.21. Structure d'un robot SCARA. [19]

I.7.2.5. Structure 3R (anthropomorphe) :

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 différent types de taches et disposant d'un volume de travail conséquent [17].

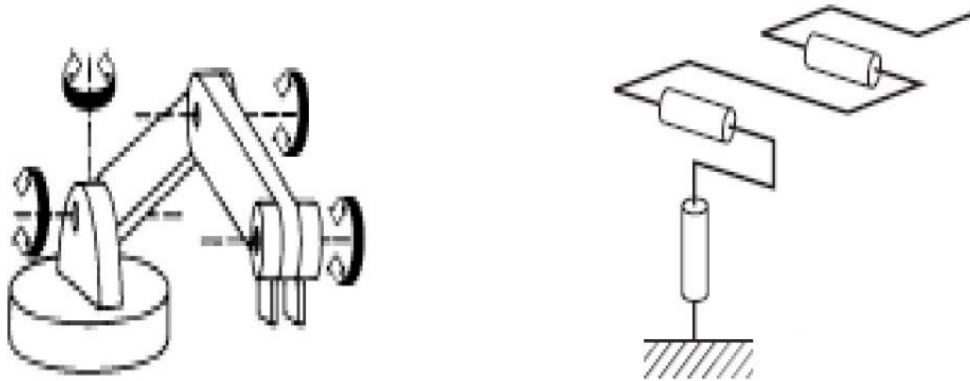


Fig.I.22. Structure d'un robot 3R. [19]

I.8. Caractéristiques d'un robot :

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

- Charge utile transportable par le robot.
- Espace de travail : c'est l'ensemble des situations de l'espace que l'organe terminal du robot peut atteindre.
- Vitesses et les accélérations maximales, qui conditionnent le temps du cycle.
- Performances (l'écart entre une situation commandée et la moyenne des situations atteintes) [20].

I.9. Domaines d'application :

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

I.9.1. Tâches simples :

La grande majorité des robots est utilisée pour des tâches simples et répétitives. Ils sont programmés une fois pour toute au cours de la procédure d'apprentissage. Les critères de choix de la solution robotique sont :

- Tâche est assez simple pour être robotisée.
- Critères de qualité sur la tâche sont importants.
- Pénibilités de la tâche (peinture, charge lourde, environnement hostile, ...).

Exemples de robots utilisés pour des tâches simples : robots soudeurs par points et robots soudeurs à l'arc.

I.9.2. Tâches complexes :

Robotique de service :

- Robot pompiste.
- Robot de construction.
- Robot assistance aux personnes handicapées.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la robotique : l'historique des robots, leurs structures, leurs utilisations, leurs différents types, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'application ce qui va nous servir pour la construction de notre bras.

Chapitre II :
DESCRIPTION
MECANIQUE ET
MODELISATION

II.1. Introduction :

Dans tout système en robotique la mécanique et l'électronique sont liées, ceci se matérialise par l'étude des actionneurs des chaînes cinématiques associées et aussi par l'étude des capteurs qui constituent la source d'information. L'objectif de notre travail est de réaliser et commander un bras manipulateur à quatre degrés de liberté en utilisant une carte Arduino. Dans ce chapitre, on va d'abord décrire la partie mécanique de notre bras manipulateur, puis on va passer à la modélisation, qui consiste à représenter les aspects importants d'un système en décrivant les relations entre ses différentes grandeurs par des relations mathématiques.

II.2. Description de la partie mécanique du bras manipulateur :

II.2.1. Structure mécanique du bras :

La réalisation du bras manipulateur (baptisé BM1) a débuté par la conception de la structure des pièces mécaniques constituant le bras réalisé sur le logiciel SolidWorks. Après on a passé à la réalisation mécanique réelle.

Pour réaliser le BM1 nous avons opté à utiliser le plexiglass. Le choix de ce matériau a été basé sur sa légèreté, sa disponibilité et son cout raisonnable. La figure ci-dessous montre les pièces de la structure mécanique du bras manipulateur sous le logiciel SolidWorks :

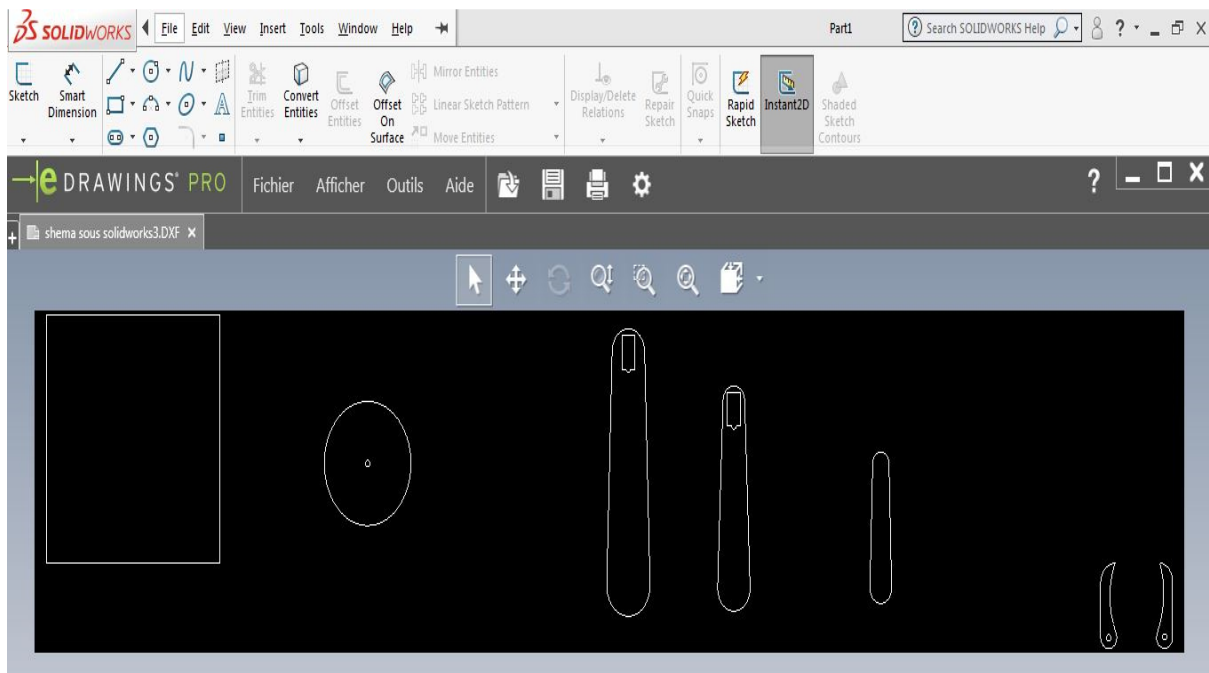


Fig.II.1. Pièces du bras manipulateur sous SolidWorks.

On a utilisé quatre servomoteurs pour la commande des articulations et un pour l'ouverture et la fermeture de la pince (pour plus de détails voir chapitre III). Les cinq parties importantes formant le bras sont les suivantes :

II.2.1.1. Base :

La base est le socle fixe du bras, elle contient un servomoteur qui permet la rotation du bras de 0° à 180° . Lorsque nous avons assemblé tout le bras, nous avons remarqué une légère inclinaison de la base à cause du poids exercer sur elle. Comme le montre la figure suivante :

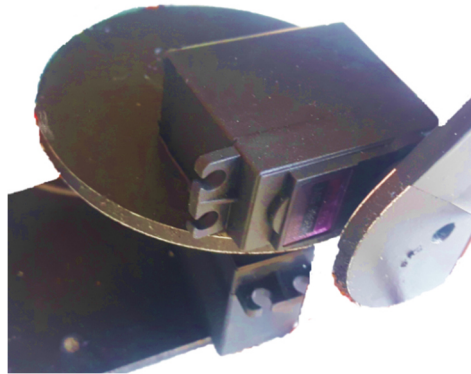


Fig.II.2. Base du BM1.

II.2.1.2. Arrière-bras :

Elle est liée à la base à travers la deuxième articulation (épaule) qui permet l'antépulsion ou la rétropulsion.

II.2.1.3. Avant-bras :

Il est lié à l'arrière-bras par la troisième articulation (coude) qui permet la flexion ou l'extension.

II.2.1.4. Poignet :

Il est lié à l'avant-bras par la quatrième articulation qui permet l'extension ou la flexion de poignet.

La fig.II.3 représente les trois constituants décrits ci-dessus.



Fig.II.3. Arrière-bras, avant-bras et poignet du BM1.

II.2.1.5. Pince :

C'est l'organe terminal du bras manipulateur, un servomoteur assure l'ouverture et la fermeture de la pince, comme le montre la figure suivante.

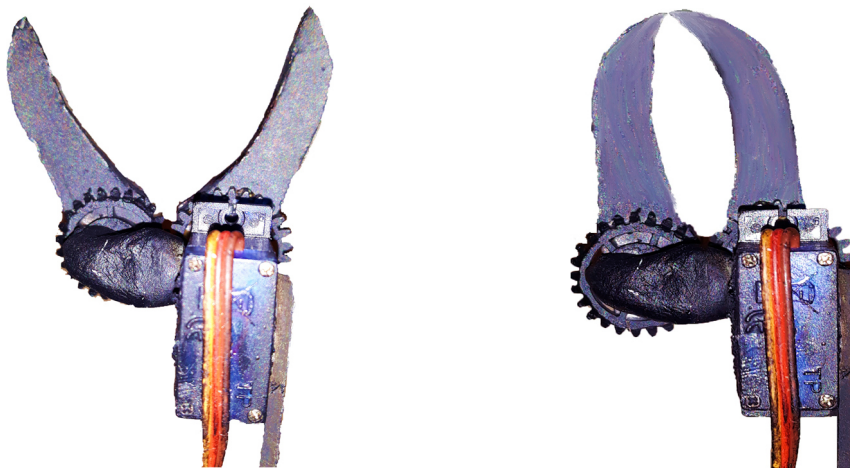


Fig.II.4. Pince du BM1.

II.2.2. Bras manipulateur assemblé :

Après avoir vu les différentes pièces constituant le bras manipulateur, nous avons passé à leur assemblage. La figure ci-dessous montre le bras manipulateur après l'assemblage.

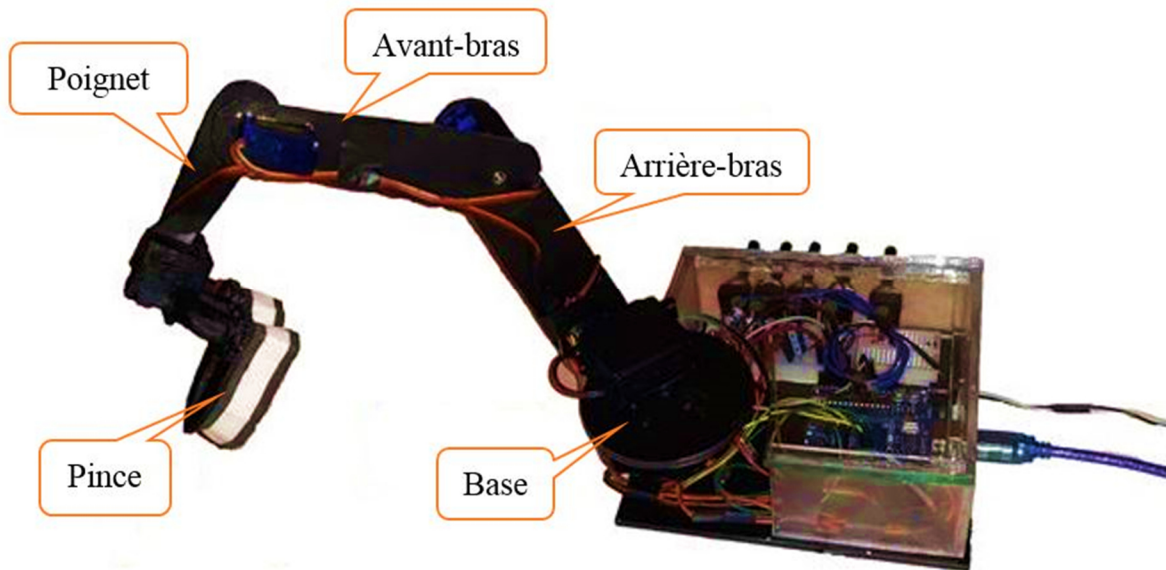


Fig.II.5. BM1 assemble.

II.2.3. Organes constitutifs d'un bras manipulateur :

Pour que le bras manipulateur puisse exécuter une tâche il a besoin d'actionneur et de transmetteur, ces derniers servent à transmettre de l'énergie des actionneurs aux articulations rotoïde. De plus pour asservir ces actionneurs on a besoin aussi des capteurs [26].

II.2.3.1. Actionneurs :

Il s'agit d'organes qui permettent au robot d'exécuter une tâche. Leur but est de produire assez de force pour provoquer le mouvement du robot, celui-ci représente la transformation d'une énergie mécanique.

Les trois actionneurs les plus utilisés sont les actionneurs hydrauliques surtout pour les grands robots qui peuvent soulever plusieurs dizaines de kilogrammes, les moteurs électriques souvent utilisés et les actionneurs pneumatiques qui n'exigent pas d'asservissements (robot à mouvement séquentiels). Dans notre projet nous avons utilisé les actionneurs électriques (servomoteur) [27].

II.2.3.2. Transmission entre articulations (engrenages) :

Il est rare que la sortie d'un actionneur soit directement utilisée pour produire un mouvement. Un moteur à courant continu tourne normalement à des vitesses de l'ordre de plusieurs milliers de tours par minute et produit un couple très faible. Afin de diminuer cette vitesse de rotation tout en augmentant significativement le couple disponible, on place entre

l'axe moteur et l'axe articulaire un réducteur. La transmission entre les articulations de notre bras manipulateur est assurée par un système d'engrenage illustre dans la figure suivante [28].

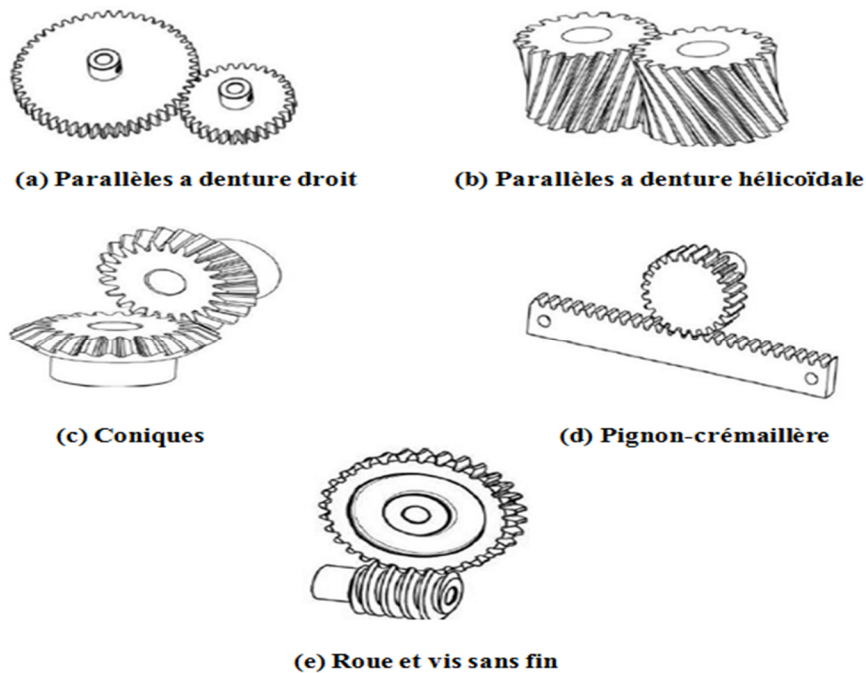


Fig.II.6. Différents types d'engrenage. [28]

II.2.3.3. Capteurs :

Ce sont des outils de perception qui permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement. Il existe deux types de capteurs : les capteurs proprioceptifs qui mesurent l'état mécanique interne du robot (comme les capteurs de position, de vitesse ou d'accélération) et les capteurs extéroceptifs qui recueillent des informations sur l'environnement (comme la détection de présence, la mesure de distance...etc.). Les capteurs ont comme fonction de lire les variables relatives au mouvement du robot pour permettre un contrôle convenable. Nous n'avons pas utilisé un capteur extéroceptif car dans notre application nous considérons que l'espace de travail est sans obstacle [26].

L'utilisation des capteurs proprioceptifs n'était pas également nécessaire vu que les servomoteurs contiennent un capteur potentiométrique qui sert à l'asservissement de position.

II.3. Modélisation de système :

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender, il peut s'agir d'un système mathématique ou physique.

II.3.1. Modélisation du moteur électrique à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont importants dans les systèmes de commande, il est donc nécessaire d'établir et d'analyser leurs modèles [29].

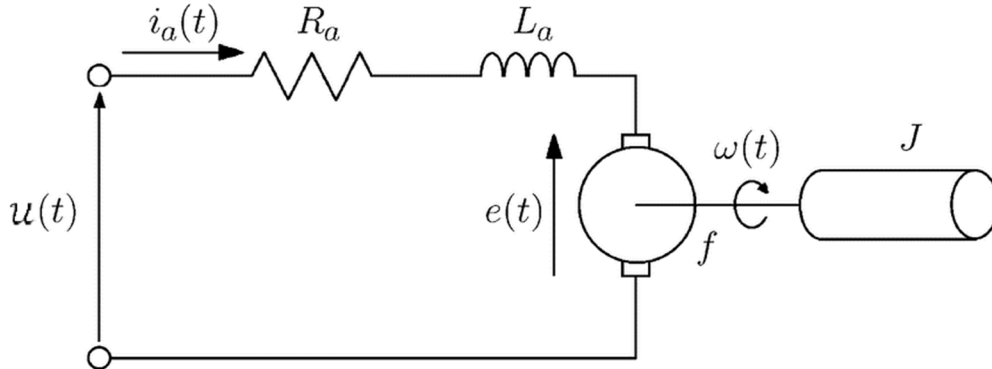


Fig.II.7. Représentation schématique du moteur CC. [29]

II.3.1.1. Equations :

Equation électrique :

$$U(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t) \quad (\text{II.1})$$

L'équation (II.2) illustre la relation de conversion électromécanique entre la force électromotrice produite et la vitesse de l'arbre :

$$E(t) = K \cdot \phi \cdot w(t) \quad (\text{II.2})$$

Où :

E : Désigne la force électromotrice arrière.

w : vitesse de l'arbre du moteur.

ϕ : Le flux magnétique.

Equation mécanique :

$$C_{em}(t) = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} + C_r(t) + f \cdot w(t) \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.4) indique la relation de conversion électromécanique entre le couple actuel et le développé :

$$C_{em}(t) = K \phi I_a(t) \quad (\text{II.4})$$

Où :

$C_{em}(t)$: est le couple du moteur produit par l'arbre du moteur.

ϕ : Le flux magnétique.

K : Est une constante.

II.3.1.2. Transformée de la place :

$$\begin{aligned} \bullet U(t) &= R_a \cdot I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t) \\ \rightarrow U(P) &= R_a \cdot I_a(P) + L_a P I(P) + E(P) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{aligned} \bullet E(t) &= K \cdot \phi \cdot w(t) \\ \rightarrow E(P) &= K \cdot \phi \cdot w(P) \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{aligned} \bullet J \cdot \frac{dw(t)}{dt} &= C_{em}(t) - C_r(t) - f \cdot w(t) \\ \rightarrow J P w(P) &= C_{em}(P) - C_r(P) - f \cdot w(P) \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{aligned} \bullet C_{em}(t) &= K \phi I_a(t) \quad (\text{II.4}) \\ \rightarrow C_{em}(P) &= K \phi I_a(P) \quad (\text{II.8}) \end{aligned}$$

II.3.1.3. Calcule des fonctions de transferts partielles :

Il est plus facile de résoudre les équations différentielles dans le domaine de Laplace. En premier lieu on doit transformer les équations du moteur dans le domaine de Laplace.

$$I_a(P) = \frac{U(P) - E(P)}{R_a + L_a P} \rightarrow \frac{I_a(P)}{U(P) - E(P)} = \frac{1}{R_a + L_a P} = \frac{K_e}{1 + \tau_e P} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} K_e = \frac{1}{R_a} \text{ gain électrique} \\ \tau_e = \frac{L_a}{R_a} \text{ temps de réponse électrique} \end{cases}$$

$$\frac{E(P)}{w(P)} = \frac{C_{em}}{I_a(P)} = K \quad (\text{II.10})$$

$$w(P) = \frac{C_{em} - C_r}{f + J P} \rightarrow \frac{w(P)}{C_{em} - C_r} = \frac{1}{f + J P} = \frac{K_m}{1 + \tau_m P} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} K_m = \frac{1}{f} \text{ gain mécanique} \\ \tau_m = \frac{J}{f} \text{ temps de réponse mécanique} \end{cases}$$

J et f sont respectivement le moment d'inertie et le coefficient de frottement du moteur.

A partir des équations précédentes, on trace le schéma fonctionnel du moteur à CC qui est illustré dans la figure (II.8), avec la valeur nulle de couple résistant C_r dû à la charge entraînée.

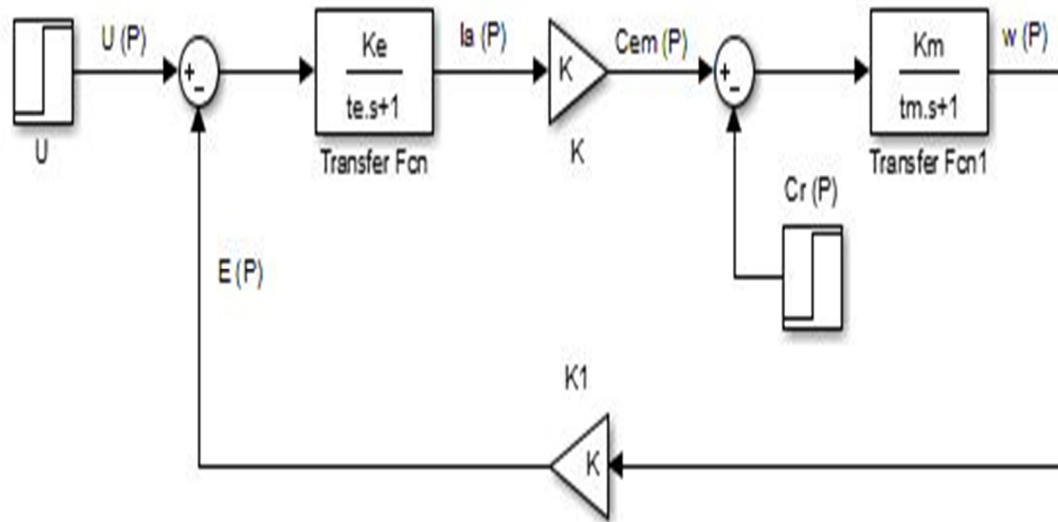


Fig.II.8. Schéma bloc du moteur.

► Asservissement en boucle fermé par PID en multipliant par le terme $\frac{1}{s}$:

Pour simuler la position de moteur à courant continu.

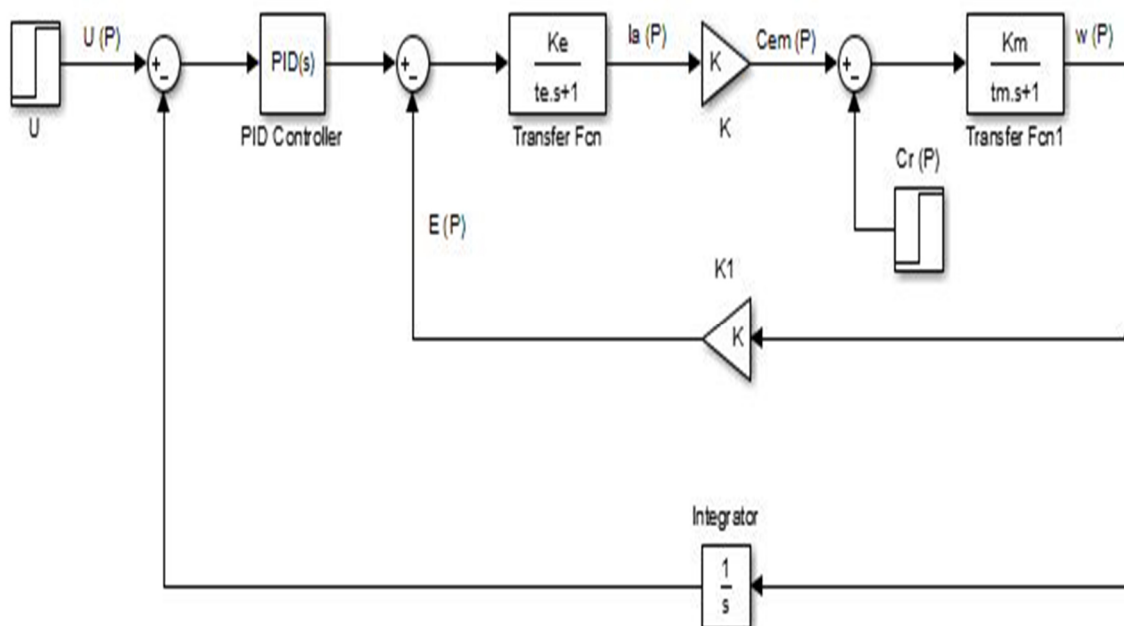


Fig.II.9. Asservissement en boucle fermé commandé par PID.

Tableau.II.1. Paramètres et valeurs du moteur CC. [29]

Paramètres	Nomenclature	Valeurs
Moment d'inertie	J	$0,000052 \text{ Kg.m}^2$
Coefficient de frottement	f	$0,01 \text{ N.ms}$
Constante de couple	K	$0,235 \text{ Nm/s}$
Résistance électrique	R_a	2 ohms
Inductance électrique	L_a	0.23 H

II.3.2. Modélisation d'un bras manipulateur :

II.3.2.1. Présentation du bras manipulateur :

Le bras manipulateur est un système de positionnement où les forces agissantes au niveau des articulations sont produites par des actionneurs. Ces derniers peuvent être de type pneumatique ou électrique (servomoteur dans notre cas).

L'objectif de notre travail est de réaliser et commander un bras manipulateur à quatre degrés de liberté en utilisant une carte Arduino.

II.3.2.2. Notion de position :

Pour exprimer les notions de repos et de mouvement par rapport à un référentiel, considérons un repère orthonormé $\mathcal{R}(x, y, z)$ dans lequel est repérée la position $M(x, y, z)$ d'un corps. Le corps est au repos par rapport à ce repère si ses coordonnées sont constantes au cours du temps. Cependant, si au moins l'une d'elles varie, le corps est en mouvement par rapport à \mathcal{R} [30].

Il existe plusieurs types de coordonnées pour repérer la position :

II.3.2.3. Coordonnées cartésiennes :

C'est le référentiel le plus utilisé en robotique, car il est plus simple dans le cas de la mesure de la distance.

Dans la base $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur \overrightarrow{OM} se décompose d'une manière unique sous la forme :

$$\overline{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

Ou (x, y, z) sont les composantes du vecteur \overline{OM} dans la base $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$,
 $x =$ abscisse de M ; $y =$ ordonnée de M ; $z =$ cote de M. [30]

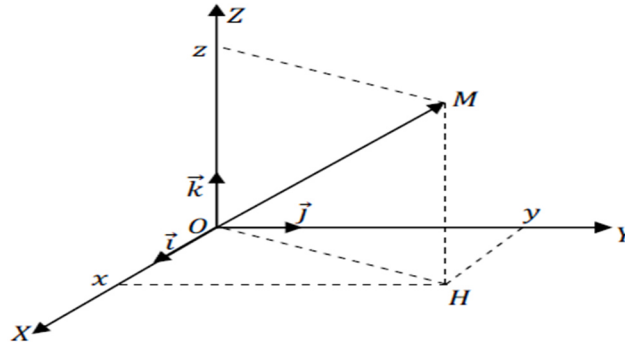


Fig.II.10. Coordonnées cartésiennes. [30]

II.3.2.4. Coordonnées polaires :

Un point est repéré par ses coordonnées (ρ, θ) dites cylindrique [30], illustrées sur la figure suivante :

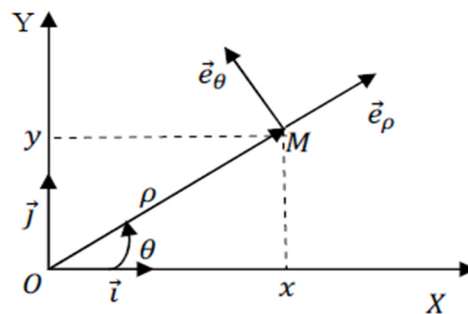


Fig.II.11. Coordonnées polaires. [30]

Les coordonnées polaires sont liées aux coordonnées cartésiennes par les relations suivantes [30] :

$$\begin{cases} X = \rho \cos(\theta) \\ y = \rho \sin(\theta) \end{cases}$$

Et inversement :

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \text{atang} \left(\frac{x}{y} \right) \end{cases}$$

Avec $\theta \in [0, 2\pi]$

II.3.2.5. Coordonnées cylindriques :

Un point est repéré par ses coordonnées (ρ, θ, z) dites cylindrique [30], illustrées sur la figure suivante :

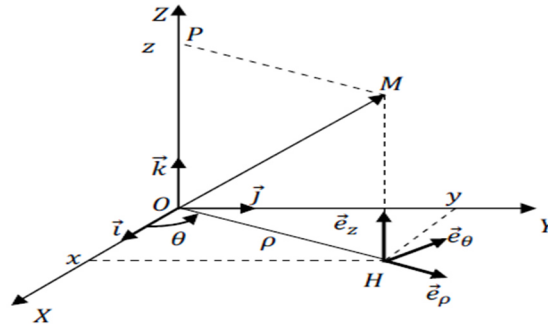


Fig.II.12. Système de coordonnées cylindriques. [30]

Les coordonnées cylindriques sont liées aux coordonnées cartésiennes par les relations suivantes [30] :

$$\begin{cases} X = \rho \cos(\theta) \\ y = \rho \sin(\theta) \\ z = z \end{cases}$$

Et inversement :

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \text{atang} \left(\frac{x}{y} \right) \\ z = z \end{cases}$$

Avec $\theta \in [0, 2\pi]$

II.3.2.6. Coordonnées sphériques :

Un point est repéré par ses coordonnées (r, θ, Φ) dites sphérique [30], illustrées sur la figure suivante :

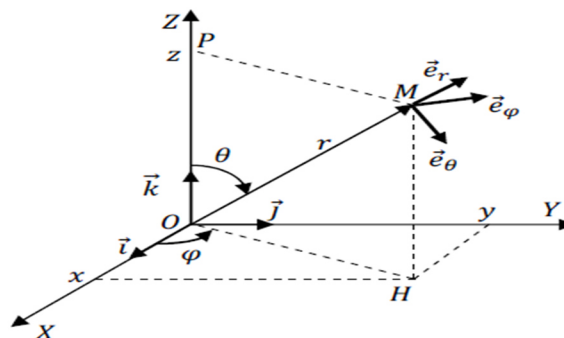


Fig.II.13. Système de coordonnées sphérique. [30]

Le passage entre coordonnées sphérique et cartésiennes se fait comme suit : [30]

$$\begin{cases} x = r \sin(\theta) \cos(\phi) \\ y = r \sin(\theta) \sin(\phi) \\ z = r \cos(\theta) \end{cases}$$

Et inversement :

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \\ \phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{cases}$$

Avec : $\theta \in [0, \pi]$

$\phi \in [0, 2\pi]$

II.3.3. Modèle Géométrique direct :

Le modèle géométrique direct permet d'obtenir l'attitude du repère attaché à l'organe terminal du bras manipulateur à partir des positions articulaires.

Ce modèle ne prend pas en compte la vitesse de déplacement ni les forces et les moments qui créent le mouvement. L'expression de la situation de l'organe terminal du bras manipulateur en fonction de sa configuration est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$X = f(q)$$

Où x est le vecteur des coordonnées opérationnelles exprimées dans le repère de référence R_0 et q les variables articulaires.

Dans le cas d'une chaîne cinématique simple ouverte, il peut être représenté par la matrice $T_{0,\eta}$ qui se calcule par :

$$T_{0,\eta} = T_{0,1}(q_1) \times T_{0,2}(q_2) \times \dots \times T_{j-1,j}(q_j)$$

La matrice $T_{0,\eta}$ représente la position et l'orientation, elle est exprimée dans le repère de référence R_0 de l'organe terminal (effecteur) du robot [31].

II.3.3.1. Paramètre de DENAVIT- HARTENBERG (D-H) :

D-H est la convention utilisée pour choisir le système de référence en robotique. Elle fut introduite par Jacques DENAVIT et Richards HARTENBERG [31] [32].

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivantes :

1/ α_j : angle entre les axes z_{j-1} et z_j correspondant à une rotation autour de x_{j-1}

2/ d_j : distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1} .

3/ θ_j : angle entre l'axe x_{j-1} et x_j correspondant à une rotation autour de z_j .

4/ r_j : distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_j .

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(x, \alpha_j) \times \text{Trans}(x, d_j) \times \text{Rot}(z, \theta_j) \times \text{Trans}(z, r_j).$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -s\theta_j & 0 & d_j \\ c\alpha_j s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & -s\alpha_j & -r_j s\alpha_j \\ s\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j c\theta_j & c\alpha_j & r_j c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le bras manipulateur doit suivre une trajectoire précise lors du déplacement d'un objet à un endroit désigné par les coordonnées X, Y, et Z. Cette tâche nécessite l'utilisation du modèle géométrique direct. Pour notre cas le modèle cinématique et le modèle dynamique ne sont pas nécessaires puisque la vitesse et le temps d'exécution de la tâche ne sont pas importantes [31] [32].

II.3.3.2. Modélisation du bras manipulateur réalisé :

Le bras manipulateur (BM réalisé) est constitué de deux sous-ensembles distincts : un organe terminal et une structure mécanique articulée. Le rôle de cette dernière est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée. Son architecture est une chaîne cinématique ouverte simple de corps rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations (4 rotoïde et une pince).

Ces articulations sont actionnées par des servomoteurs qui s'actionnent par un signal de commande. Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques techniques du BM1 réalisé.

Tableau.II.2. Caractéristiques techniques du BM1.

Caractéristiques techniques du bras manipulateur	
Nombre d'articulation	4
Actionneur	Servomoteurs
Rotations	
La base	180°
L'épaule	180°
Le coude	180°
Le poignet	180°
La pince	180°

Les affectations des repères fictifs à chaque articulation sont représentées dans la figure ci-dessous :

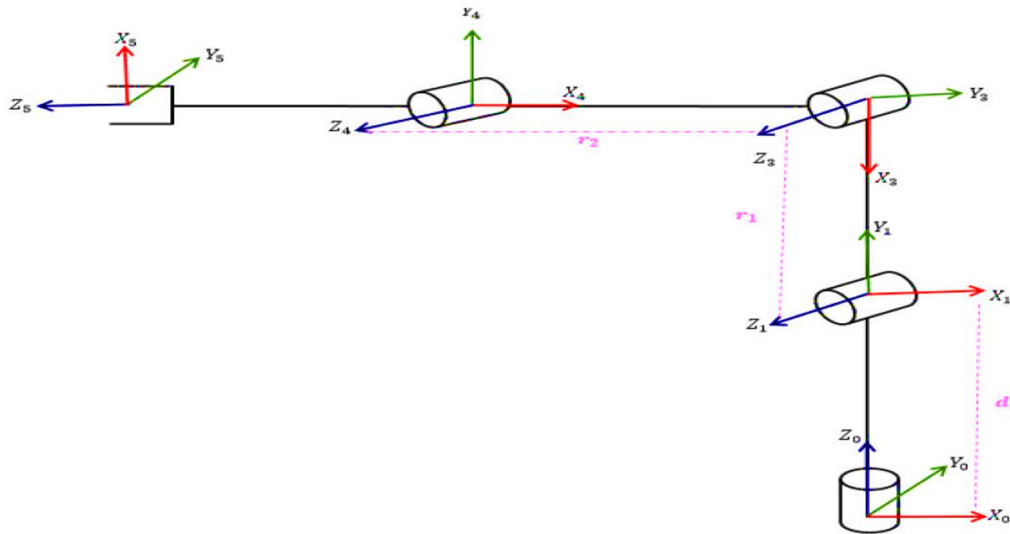


Fig.II.14. Placement des repères et notation du bras manipulateur. [32]

II.3.3.3. Identification des paramètres de DH de BM1 réalisé :

Tableau.II.3. Paramètres de DENAVIT- HATENBERG du BM1. [31] [32]

Segment	θ_j	d_j	α_j	r_j
1	θ_1	d_1	$\pi/2$	0
2	θ_1	0	0	r_1
3	θ_1	0	0	r_2
4	θ_1	0	$-\pi/2$	0

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & d_1 \\ c\alpha_1 s\theta_1 & c\alpha_1 c\theta_1 & -s\alpha_1 & -r_1 s\alpha_1 \\ s\alpha_1 s\theta_1 & s\alpha_1 c\theta_1 & c\alpha_1 & r_1 c\alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & d_2 \\ c\alpha_2 s\theta_2 & c\alpha_2 c\theta_2 & -s\alpha_2 & -r_2 s\alpha_2 \\ s\alpha_2 s\theta_2 & s\alpha_2 c\theta_2 & c\alpha_2 & r_2 c\alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & d_3 \\ c\alpha_3 s\theta_3 & c\alpha_3 c\theta_3 & -s\alpha_3 & -r_3 s\alpha_3 \\ s\alpha_3 s\theta_3 & s\alpha_3 c\theta_3 & c\alpha_3 & r_3 c\alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & d_4 \\ c\alpha_4 s\theta_4 & c\alpha_4 c\theta_4 & -s\alpha_4 & -r_4 s\alpha_4 \\ s\alpha_4 s\theta_4 & s\alpha_4 c\theta_4 & c\alpha_4 & r_4 c\alpha_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation homogène du repère R_0 jusqu'au repère R_4 s'obtient par la multiplication successive des matrices du passage précédent [31] [32] :

$${}^0_4T = {}^0_1T(q_1) \times {}^1_2T(q_2) \times {}^2_3T(q_3) \times {}^3_4T(q_4).$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} X_{4x} & X_{4y} & Z_{4x} & P_{4x} \\ Y_{4y} & Y_{4z} & Z_{4y} & P_{4y} \\ X_{4z} & Y_{4z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par identification avec les éléments de la matrice du passage homogène obtenu par les coordonnées opérationnelles et avec la convention [31] [32] :

$$C(\theta_i) = \cos(\theta_i) \text{ et } S(\theta_i) = \sin(\theta_i)$$

On obtient :

1^{ère} colonne :

$$X_{4x} = C\theta_4[C\theta_3(C\theta_1C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) - S\theta_3(C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2)]$$

$$X_{4y} = S\theta_4$$

$$X_{4z} = -C\theta_4[C\theta_3(S\theta_1C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + S\theta_3(S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)]$$

2^{ème} colonne :

$$Y_{4x} = -S\theta_4[C\theta_3(C\theta_1C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + S\theta_3(C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2)]$$

$$Y_{4y} = C\theta_4$$

$$Y_{4z} = -S\theta_4[-S\theta_3(S\theta_1C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3(S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)]$$

3^{ème} colonne :

$$Z_{4x} = -S\theta_3(C\theta_1C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3(-C\theta_1 S\theta_2 - S\theta_1 C\theta_2)$$

$$Z_{4y} = 0$$

$$Z_{4z} = -S\theta_3(S\theta_1C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3(S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)$$

4^{ème} colonne :

$$P_{4x} = 0$$

$$P_{4y} = -r_3 - r_2$$

$$P_{4z} = 0$$

II.4. Conclusion :

La modélisation de notre robot sériel à 4 ddl a nécessité la démarche suivante :

- Faire la description mécanique des différents organes constituant le robot.
- Représenter le comportement du ce robot sous la forme d'un modèle géométrique directe qui permette d'exprimer la situation de l'organe terminal.
- Trouver le modèle mathématique du moteur à cc.

Généralement on recherche toujours le modèle le plus simple qui permet d'expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du processus dans son domaine d'application et dans ce contexte nous avons utilisé le modèle géométrique directe pour la commande de notre bras manipulateur.

CHAPITRE III :
COMMANDE DU BRAS
MANIPULATEUR, TESTS
ET RESULTATS

III.1. Introduction :

Généralement, la fonction d'un robot manipulateur est de situer dans l'espace son organe terminal, la commande d'un bras manipulateur nécessite la commande de ses articulations une à une afin de réaliser une tâche.

Dans ce chapitre, nous cherchons à commander le bras manipulateur BM1 en position, par l'utilisation de la carte de commande Arduino qui est chargé de contrôler les servomoteurs.

A la fin on va survenir sur l'étape dite implémentation ou bien les tests de fonctionnement, alors nous allons analyser et interpréter les résultats.

III.2. Hardware :

III.2.1. Carte Arduino :

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

Cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne. Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, Arduino permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine.

Arduino est un projet en source ouverte : la communauté importante d'utilisateurs et de concepteurs permet à chacun de trouver les réponses à ses questions.

III.2.1.1 Arduino Uno :

Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328P. Il possède 14 broches d'entrée / sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sorties PWM), 6 entrées analogiques, un quartz 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation et un bouton de remise à zéro. Il contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur [33]. Comme vous pouvez le constater à l'examen de sa photo visible de, fig.III.1.

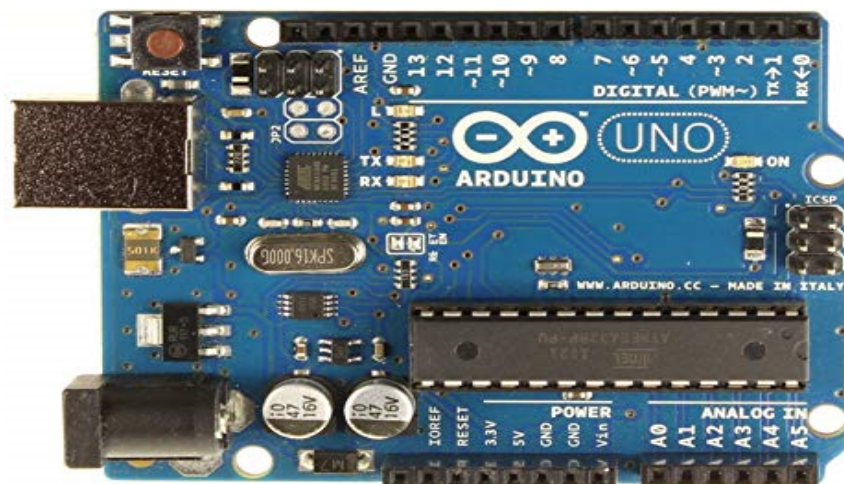


Fig.III.1. Arduino Uno. [33]

Tableau.III.1. Synthèse des caractéristiques d'Arduino. [33]

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5v)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumule pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3v	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5v	Fonction de l'alimentation utilisée - 500mA max si port USB utilise seul
Mémoire programme Flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le boot loader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

III.2.2. Actionneurs (servomoteurs) :

Un servomoteur est tout simplement un moteur à courant continu qui est asservi en position à l'aide d'un capteur de position (typiquement un potentiomètre) et un circuit électronique interne au moteur. Ils sont pilotés par un fil de commande et alimentés par deux autres fils, le premier est relié à l'alimentation positive +5 ou +6 V selon le servomoteur, le deuxième est relié à la masse (GND).

Le signal de commande est de type modulation de largeur d'impulsion (PWM). En modifiant le rapport cyclique de ce signal, on indique au moteur quelle est la position désirée dans une plage de positions possibles, généralement $[0, 180^\circ]$.

La fréquence du signal à modulation de largeur d'impulsion est habituellement de l'ordre de 50 Hz (30 Hz pour certains modèles) avec des impulsions durant de 1 à 2 ms [31] comme illustre la fig.III.2. Certaines plages de mouvement plus importantes peuvent être obtenues en changeant les engrenages du servomoteur [34].

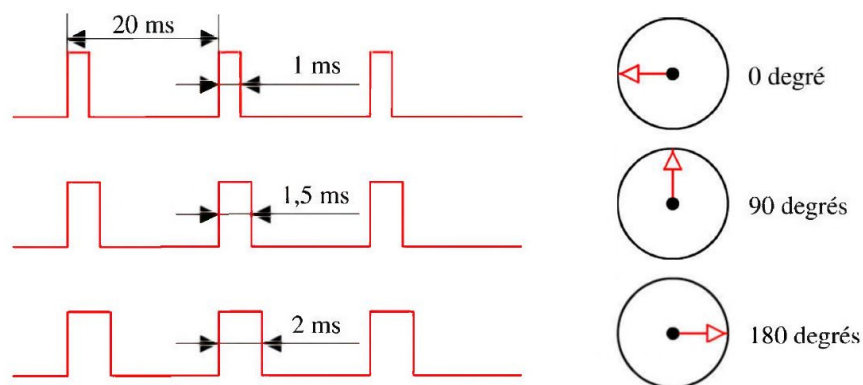


Fig.III.2. Exemple de signal en position pour un servomoteur. [34]

Dans notre réalisation nous avons utilisé deux types différents des servomoteurs qui sont illustrés ci-dessous :



Fig.III.3. De gauche à droite : (a) Servomoteur du type SG90 [34], (b) Servomoteur du type MG996R. [34]

III.2.2.1. Paramètres techniques des servomoteurs :

Ce tableau illustre les paramètres des servomoteurs qu'on a utilisé :

Tableau III.2. Paramètres techniques des servomoteurs utilisés. [34]

Références	SG90	MG996R
Spécifications		
Poids	9g	55 g
Couple d'arrêt	1.8 kgf ·cm	9.4 kgf ·cm (4.8 V), 11 kgf ·cm (6 V)
Tension de fonctionnement	4.8 V (~5V)	4.8 V à 7.2 V
Vitesse	0.1 s/60°	0.17 s/60o (4.8 V) ,0.14 s/60o (6V).
Rotation angle	180°	180°

III.2.3. Potentiomètres :

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont un est relié à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance [34].

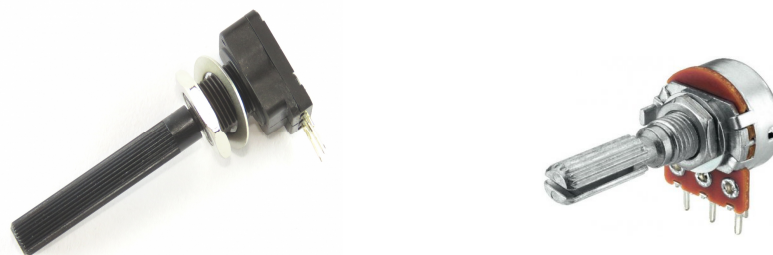


Fig.III.4. Potentiomètres 10 KOhm. [34]

III.2.4. Alimentation :

L'alimentation par un chargeur qui est un appareil permettant de recharger un ou plusieurs accumulateurs électriques, groupés ou non en batterie, en injectant un courant électrique inverse au sens d'utilisation (décharge).

III.2.5. Fils de connexion :

Un fil électrique qui relie les dipôles d'un circuit entre eux. Son rôle est de permettre au courant électrique de circuler entre ces dipôles. Les fils de connexion sont utilisés au collège car ils permettent de réaliser facilement des connexions [34].

Et voilà la figure ci-dessous montre les fils utilisées pour la connexion entre l'Arduino et son environnement.



Fig.III.5. Fils de connexion. [34]

III.2.6. Condensateurs :

Le condensateur est un composant électrique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices (appelées « électrodes ») en influence totale et séparées par un isolant polarisable (ou « diélectrique »). Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques opposées sur ses armatures. La valeur absolue de ces charges est proportionnelle à la valeur absolue de la tension qui lui est appliquée [34].

Le condensateur est utilisé principalement pour :

- stabiliser une alimentation électrique (il se décharge lors des chutes de tension et se charge lors des pics de tension).
- traiter des signaux périodiques (filtrage...).
- séparer le courant alternatif du courant continu, ce dernier étant bloqué par le condensateur.
- stocker de l'énergie, auquel cas on parle de super condensateur. [34]

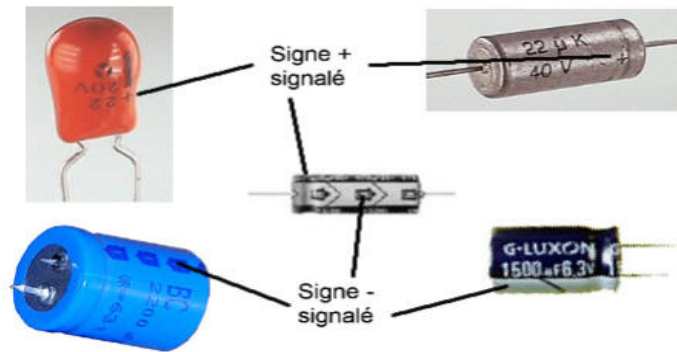


Fig.III.6. Condensateurs [34].

III.3. Software :

III.3.1. Présentation du logiciel :

III.3.1.1. Présentation du logiciel ISIS (Intelligent Schematic Input System) :

Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connue pour éditeur des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits. [35]

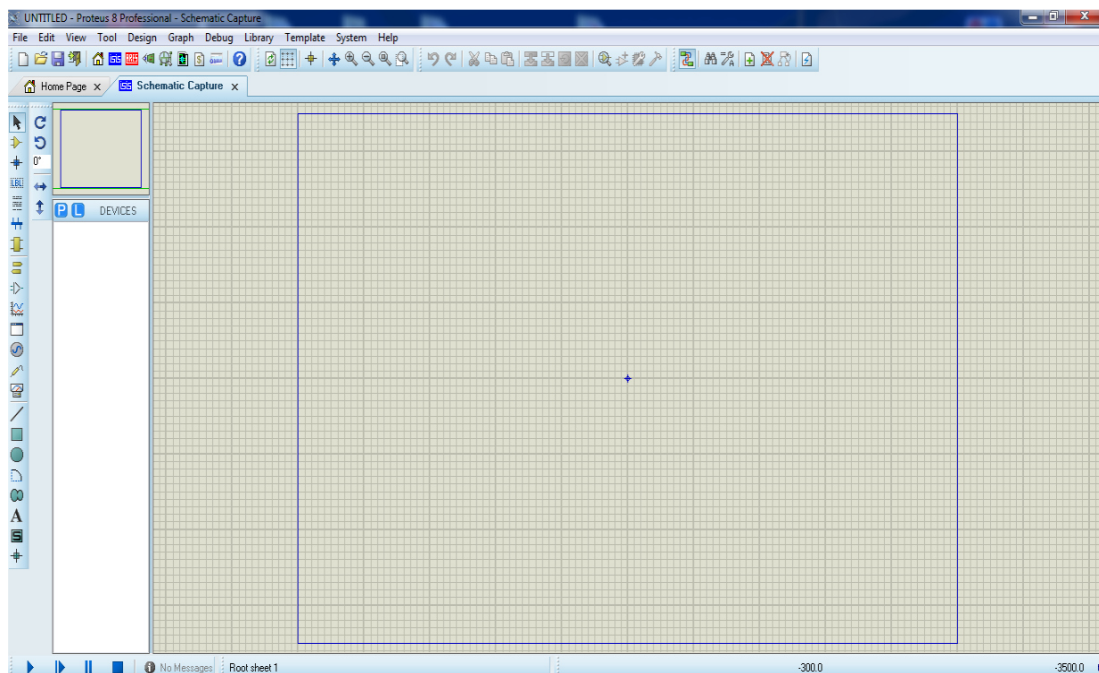


Fig.III.7. Interface de Proteus.

III.3.1.1.1. Etapes de création des schémas électriques :

On peut résumer les étapes de création de n'importe quel schéma électronique par cet organigramme.

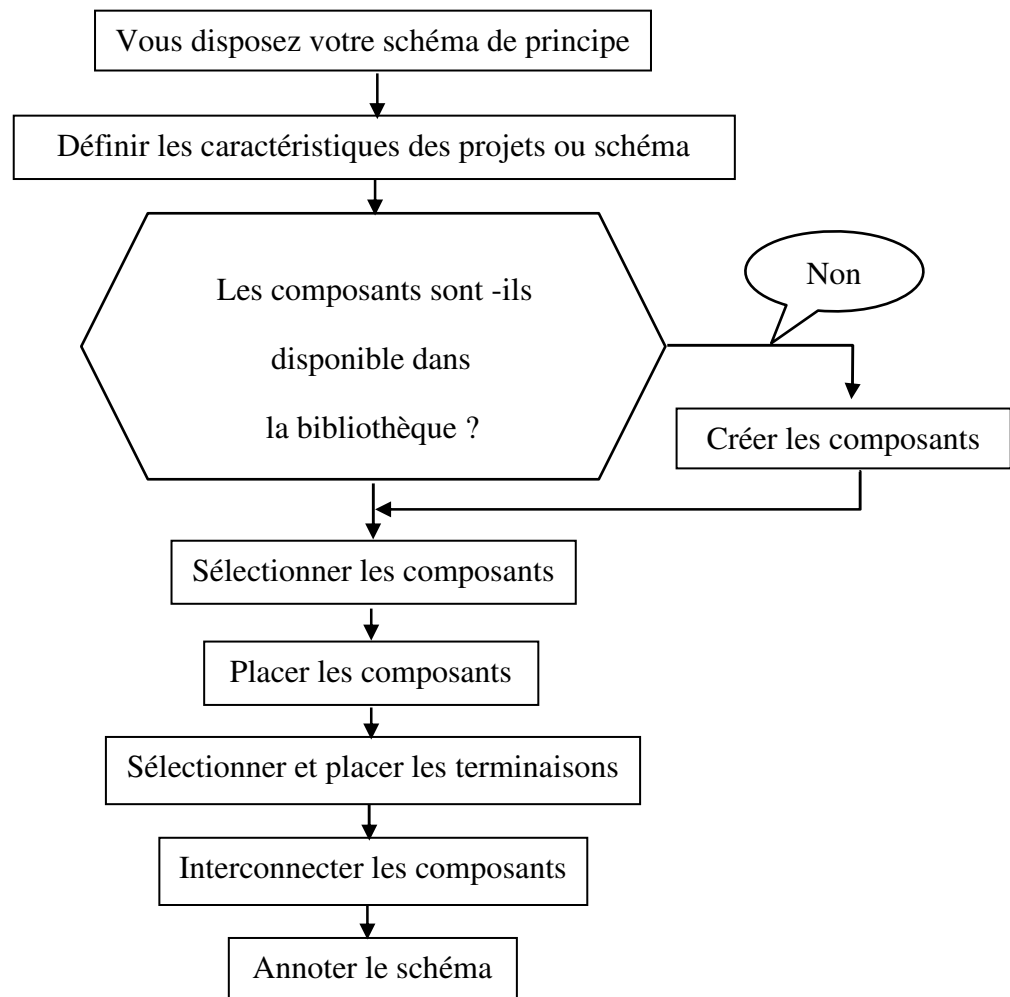


Fig.III.8. Organigramme des étapes de la saisie des schémas. [23]

III.3.1.1.2. Description de la simulation de bm1 :

La carte de commande est équipée de :

- Un Arduino de type Uno
- Cinq potentiomètres
- Cinq moteurs pour faire bouger le BM1.

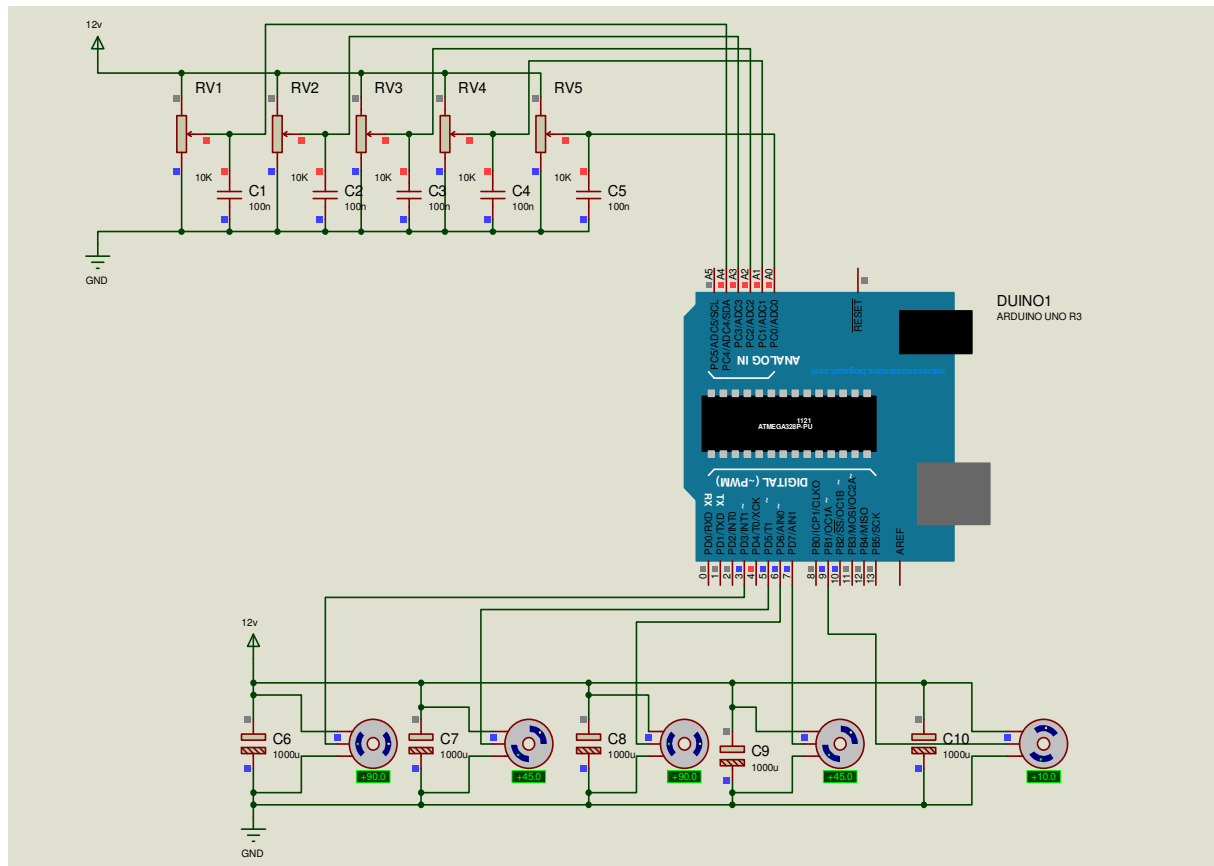


Fig.III.9. Simulation de la commande manuelle et automatique du BM1.

III.3.1.2. Logiciel de programmation Arduino :

L'environnement de programmation Arduino (IDE en anglais) est une application écrite en Java. L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensible pour la carte. Le langage de programmation de l'Arduino étant dérivé du C et de C++, il respecte les règles de syntaxe propres à ces langages où elles restent relativement simples.

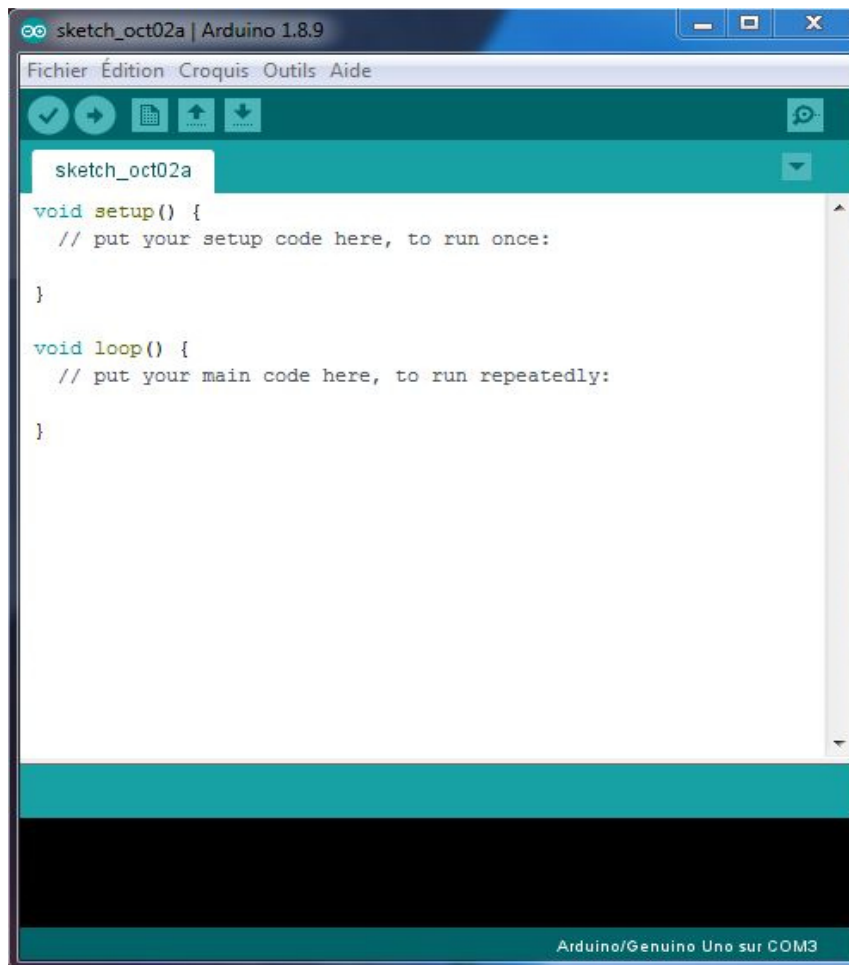


Fig.III.10. Interface d'Arduino.

III.3.2. Commande :

III.3.2.1. Commande manuelle :

III.3.2.1.2. Commande analogique des articulations :

Dans le but d'établir une commande manuelle du BM1, nous avons créé un programme qui permet de commander le bras par les résistances variable (potentiomètres). La démarche suivie est comme suit :

- Insérer la bibliothèque du servo et déclarer les constantes et les variables dont on a besoin.
- Configurer les entrée-sorties et initialiser le débit de données en bits par seconde (baud) pour transmettre les données en série.
- Mettre le BM1 dans sa position initiale à l'état de repos.
- Commander les servomoteurs du bras par la variation des angles contrôlés par les potentiomètres.

III.3.2.2. Commande Automatique :

Nous programmerons une fonction d'enregistrement et de lecture, à l'aide de moniteur série de l'Arduino, afin que nous puissions enregistrer une motion et demander au bras robotique de la répéter autant de fois que nécessaire.

L'enregistrement de la trajectoire à exécuter est dans une mémoire (de l'Arduino), sous contrôle d'un opérateur humain en utilisant la commande analogique des articulations (les potentiomètres).



Fig.III.11. Moniteur série de l'Arduino.

Après avoir cliqué sur le bouton R l'enregistrement de trajectoire commencera et après avoir cliqué sur le bouton P la lecture de trajectoire enregistrer se commence.

Donc nous obtiendrons une manipulation automatique de bras.

III.4. Résultats du test en temps réel :

III.4.1. Variation de l'entrée analogique 1 et Thêta 1 de la première articulation en fonction de temps :

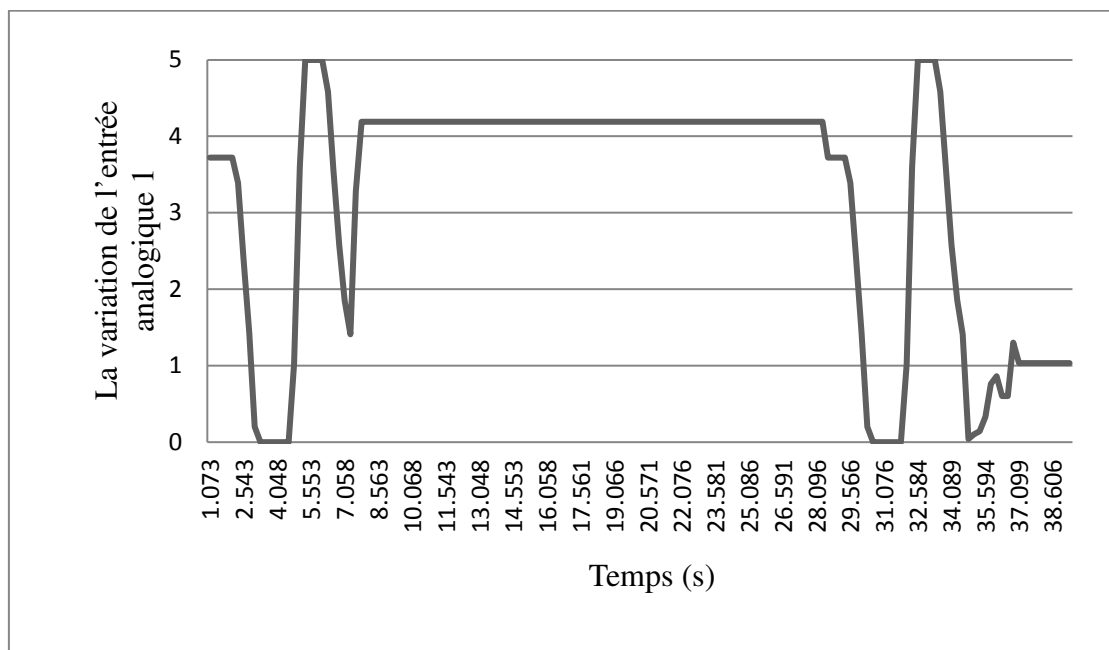


Fig.III.12. Variation de l'entrée analogique 1 de la première articulation en fonction de temps.

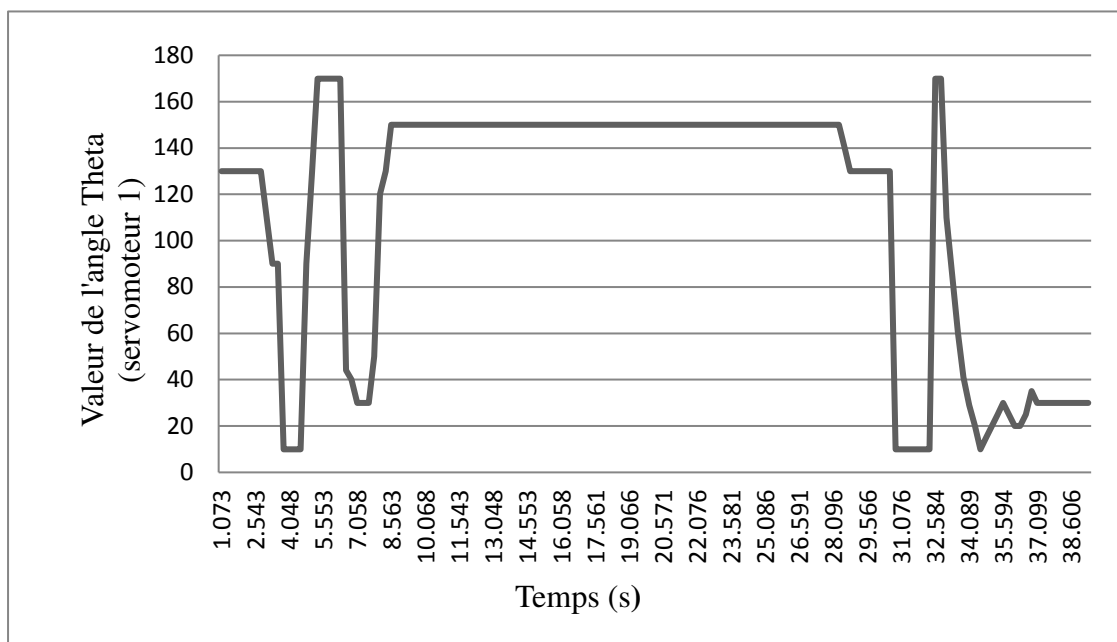


Fig.III.13. Variation de Thêta 1 de la première articulation (servomoteur 1) en fonction de temps.

III.4.2. Variation de l'entrée analogique 2 et Thêta 2 de la deuxième articulation en fonction de temps :

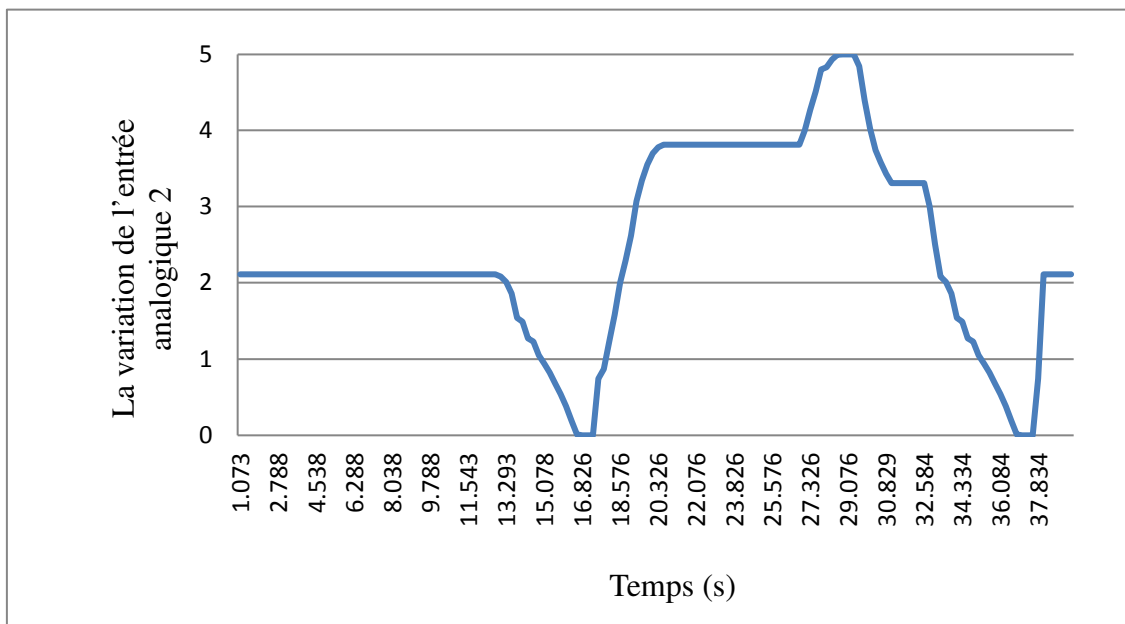


Fig.III.14. Variation de l'entrée analogique 2 de la deuxième articulation en fonction de temps.

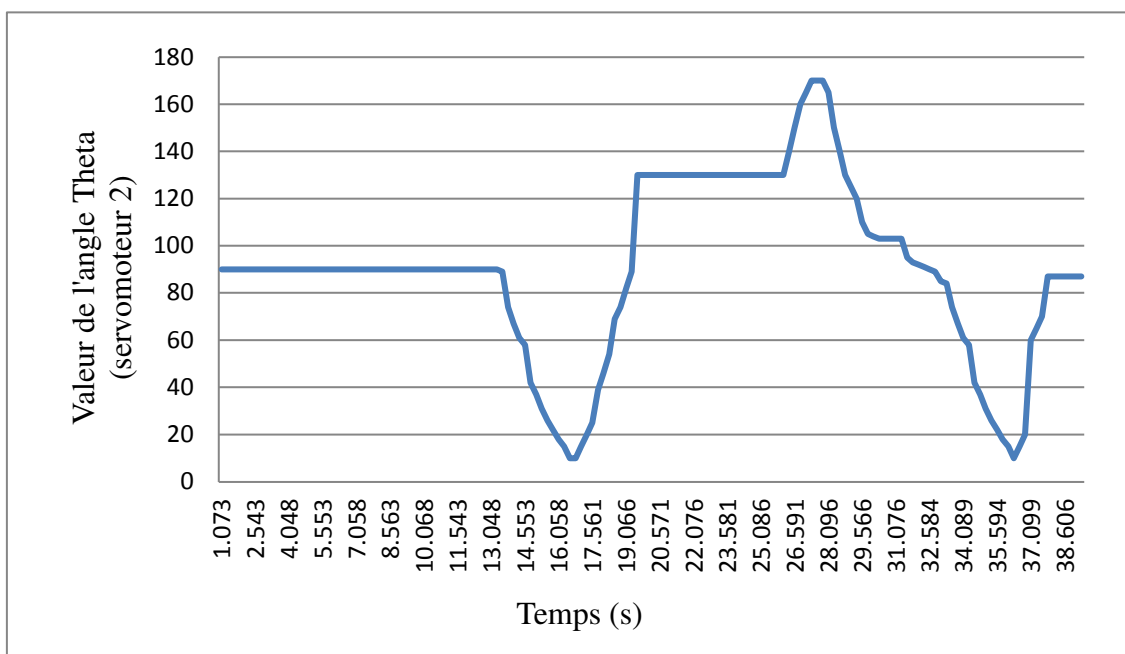


Fig.III.15. Variation de Thêta 2 de de la deuxième articulation (servomoteur 2) en fonction de temps.

III.4.3. Variation de l'entrée analogique 3 et Thêta 3 de la troisième articulation en fonction de temps :

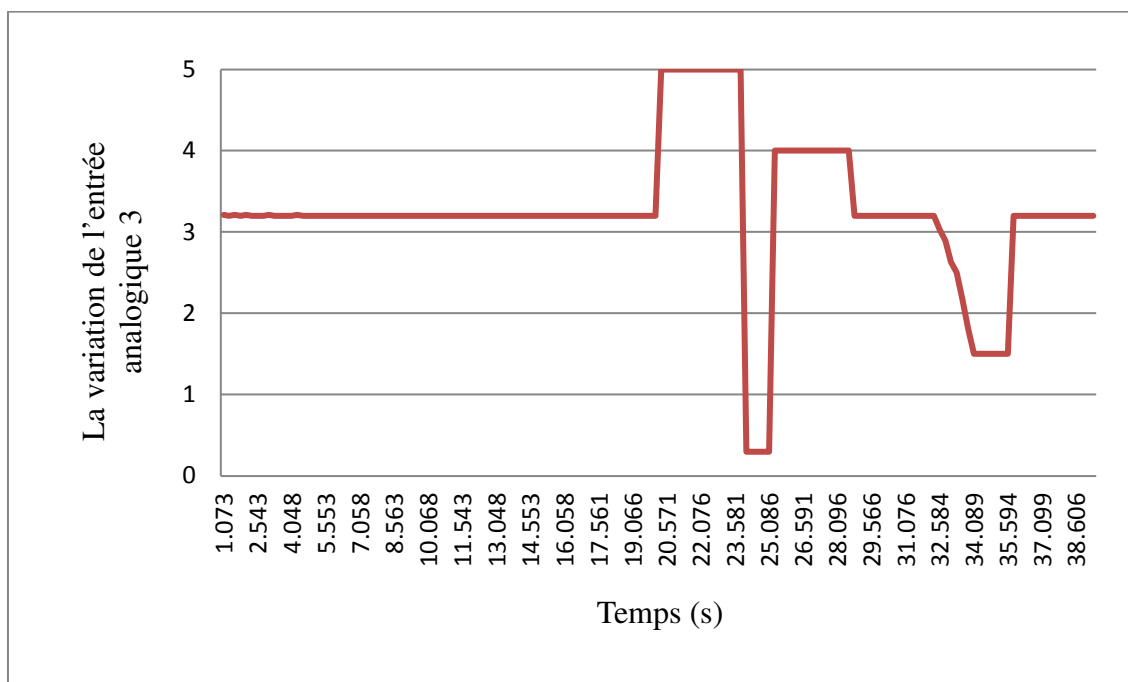


Fig.III.16. Variation de l'entrée analogique 3 de la troisième articulation en fonction de temps.

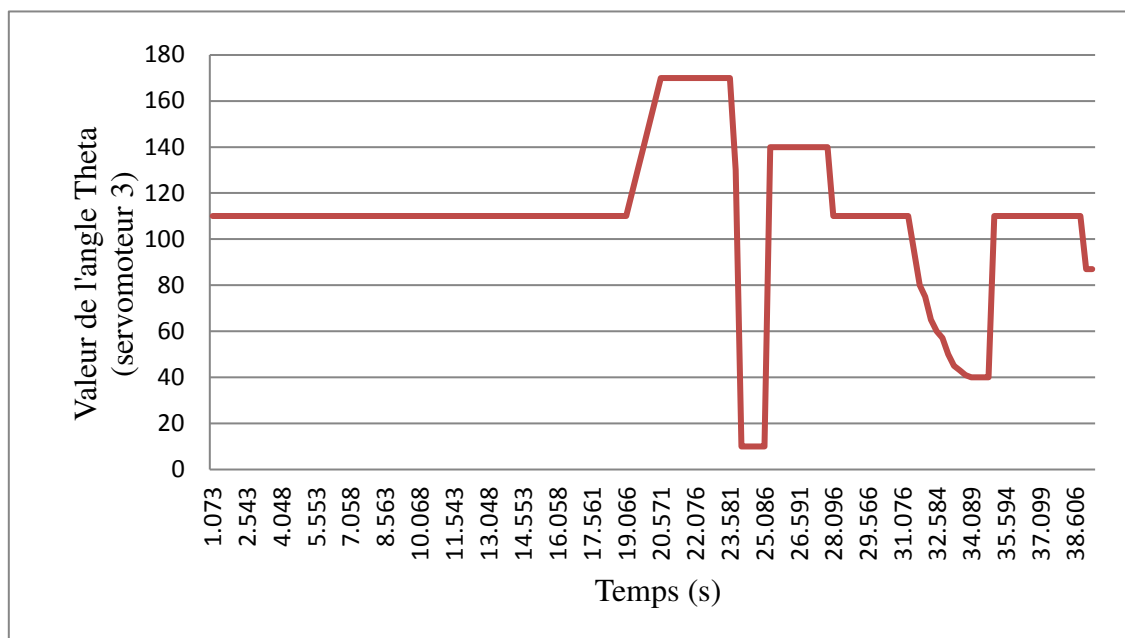


Fig.III.17. Variation de Thêta 3 de la troisième articulation (servomoteur 3) en fonction de temps.

III.4.4. Variation de l'entrée analogique 4 et Thêta 4 de la quatrième articulation en fonction de temps :

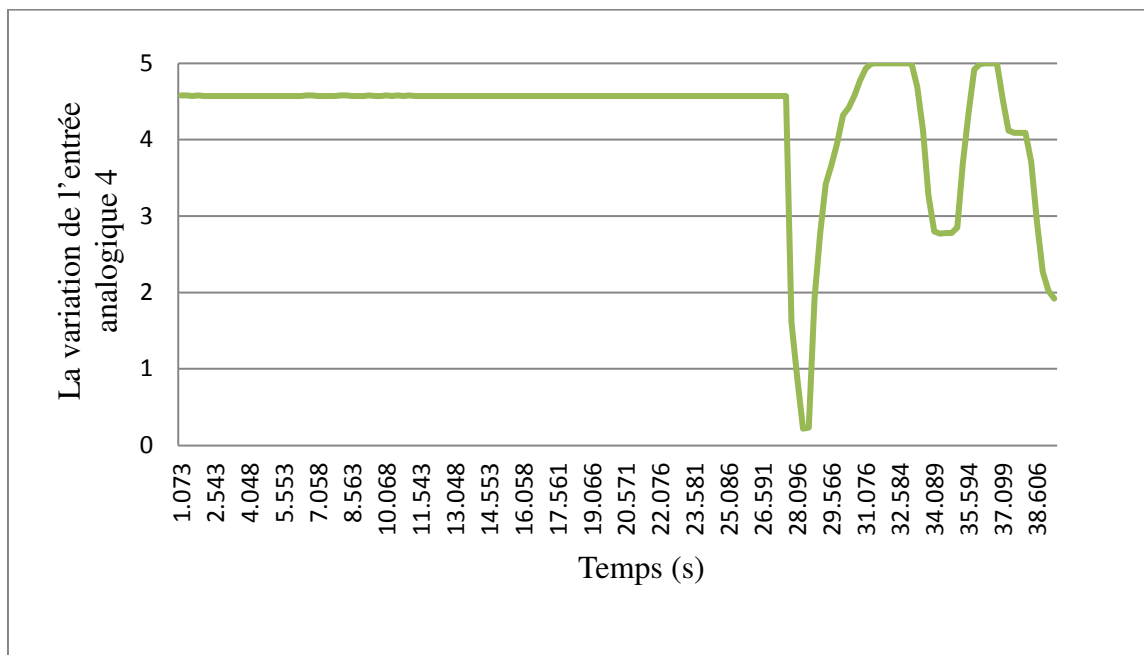


Fig.III.18. Variation de l'entrée analogique 4 de la quatrième articulation en fonction de temps.

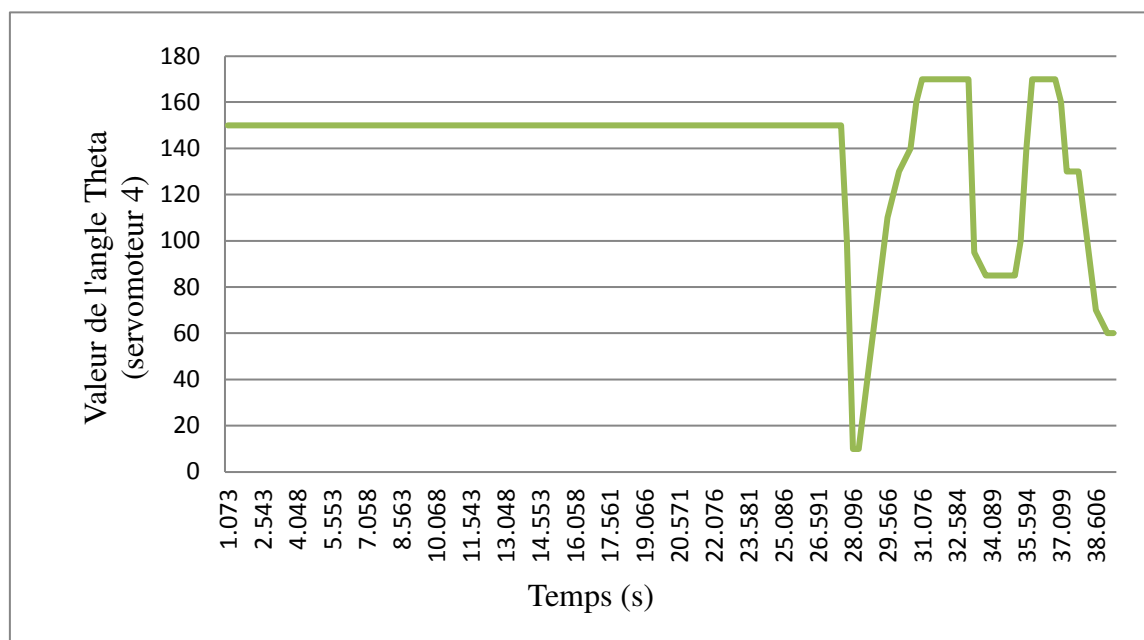


Fig.III.19. Variation de Theta4 de la quatrième articulation (servomoteur 4) en fonction de temps.

III.5. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus nous pouvons constater que ses entrées numériques ont fourni des indications comprises entre 0 et 1023 (valeur différente pour mesurer la tension) avec 10 bits de résolution qui seront converti à l'aide d'un convertisseur N/A en signaux analogiques qui varient entre 0 et 5v.

1. Quand les potentiomètres sont en position de repos l'angle Thêta est constant ne varie pas dans le temps.

2. La valeur de l'entrée analogique diminue :

- Si l'angle équivalent à la fonction qui calcule la différence entre la valeur lue et la valeur de repos est Inférieur à $170^\circ \Rightarrow$ Thêta diminue si non elle reste constante jusqu'à ce que la condition soit vérifiée

- Quand Thêta attend la valeur de 10 degrés elle reste constante.

3. la valeur de l'entrée analogique augmente :

-Si l'angle équivalent à la fonction qui calcule la différence entre la valeur lue et la valeur de repos est supérieure à $10^\circ \Rightarrow$ Thêta augmente si non elle reste constante jusqu'à ce que la condition soit vérifier

- Quand Thêta attend la valeur de 170° degrés elle reste constante.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé les différents aspects (hardware et software) relatifs à la réalisation de notre projet. Nous avons étudié également les différents composants de notre bras ainsi que la commande du bras manipulateur.

Et en fin nous avons présenté les résultats et les tests faits.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion général :

L'étude qui vient d'être présentée permet de donner une vue globale sur la commande manuelle et automatique les qu'elles sont importantes dans les différents domaines de la vie humaine, et qui ont des avantages immenses dont la commande des bras robotiques.

Sur le plan pratique, Ce projet a été abordé sur trois fronts :

- Réalisation mécanique du bras manipulateur.
- Réalisation de la carte électronique de commande.
- Programmation.

Cela nous a permis de traiter plusieurs domaines d'étude : la mécanique, l'électronique et la programmation.

Sur le plan théorique, nous avons :

- Abordé la modélisation en appliquant la convention de DENAVIT-HATEMBERG pour le calcul du modèle géométrique directe.
- Utilisé les logiciels suivants :
 - Matlab pour la simulation de moteur à courant continu.
 - Solidworks pour concevoir la structure de notre bras.
 - Isis Proteus pour simuler notre circuit électrique.
 - Arduino IDE pour programmer l'Arduino Uno.

Dans ce travail nous avons pu réaliser une carte électronique et utiliser une interface qui commande le prototype réalisé d'une façon efficace dont l'objectif de notre travail

Notre travail est tout de même susceptible d'être amélioré. Nous proposons en perspectives :

- Imprimer des pièces mécaniques plus convenables pour le robot.
- Ajouter le modèle analytique inverse pour effectuer des tâches automatiquement dans l'espace opérationnel du bras manipulateur que nous avons réalisé.
- Faire une étude sur la modélisation cinématique, dynamique directe et inverse,
- Utiliser une commande sans fil (wifi, Bluetooth....).

Références bibliographiques :

- [1] R. Abdelmoumen, “*Conception, Réalisation et Command D’un Robot Mobile*”, Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah (Ouargla), 2016.
- [2] Ait Dahmane Kahina Ait Ziane Meziane, “*Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API*”. Mémoire de Master, Faculté des Sciences et de la Technologie. Université de KHEMIS MILIANA, 2015.
- [3] BOUZIANE Fatima Zohra “*Rétroconception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible*” UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN Option Ingénierie des systèmes mécaniques productives, (2013)
- [4] P. Fisette, H. Buyse, J.C. Samin, *MECA 2732 : Introduction à la Robotique*, 10 novembre 2004.
- [5] B, Siciliano et O, Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. 2ed. Springer, 2016
- [6] Polytech Nice-Sophia. La Clepsydre. Université Nice Sophia Antipolis, France.
- [7] Académie de Rouen. Des mythes aux sciences. [En ligne]. [Consulté le : 07 septembre 2019] Disponible sur : <http://histoire-desarts.spip.ac-rouen.fr/spip.php?article151>
- [8] Al-Jazari dans Wikipedia. [En ligne]. [Consulté le : 07 septembre 2019] Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Al-Jazari>
- [9] A. A. Korinski et A. E. Korinski, *Bras Manipulateurs des Architectures et théories*. MIR, Moscou, 1985.
- [10] Alexander Winkler, *Sensorgeführte Bewegungen Stationärer Roboter*. Münster : Monsenstein et Vannerdat OHG, Universitätsverlag Chemnitz 2016.
- [11] Industrie and Technologies. Unimate le doyen de l'industrie. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.industrie-techno.com/unimate-le-doyen-de-l-industrie.32925>
- [12] Polytechnique Montréal. Cinématique du PUMA 560. [En ligne]. [Consulté le : 09 septembre 2019]. Disponible sur : <http://www.professeurs.polymtl.ca/luc.baron/index.php?id=210&lq=f>
- [13] Daniel Ichbiah, *genèse d'un peuple artificiel*. Minerva, Mars, 2005. ISBN 2830707893

- [14] Fancu. Introduction à la Robotique. [En ligne]. [Consulté le : 09 septembre 2019]. Disponible sur : <http://eduscol.education.fr>
- [15] B. ALLOUCHE, “*Modélisation et commande des robots : nouvelles approches basées sur les modèles Takagi-Sugeno*”, thèse de Doctorat, spécialité Automatique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, septembre 2016.
- [16] Ecole de technologie supérieure, Montréal. Infrastructure. [En ligne]. [Consulté le : 09 septembre 2019]. Disponible sur : <https://www.etsmtl.ca/Unites-de-recherche/CoRo/Infrastructure>
- [17] E. Dombre, *Analyse et modélisation des robots manipulateurs*, 2ème éd. Hermès Sciences, France, 2001.
- [18] A. Cherfia, “*Analyse Cinématique des Robots Parallèles*”, thèse Docteur d’état, Département génie mécanique. Université des Frères Mentouri, Constantine (Algérie), 2008.
- [19] R. Gourdeau, “*ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs*”, Département de génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010.
- [20] W. Khalil et E. Dombre “*Modélisation identification et commande des robots*”, 2e éd. Hermès Sciences, Paris, 1999.
- [21] Dalmec. Caractéristiques techniques des manipulateurs pneumatiques série artner EQUO. [En ligne]. [Consulté le : 11 septembre 2019] Disponible sur : <http://www.dalmec.com/fr/manipulateurpartner-equo/>
- [22] Digital art and innovation. L'art s'empare des robots industriels. [En ligne]. [Consulté le : 11 septembre 2019] Disponible sur : http://media.digitalarti.com/fr/blog/digitalarti_mag/lart_pour_robots_industriels
- [23] Makeblock. Ultimate 2.0 A Robot with Endless Possibility. [En ligne]. [Consulté le : 11 septembre 2019] Disponible sur : <https://store.makeblock.com>
- [24] S. Ramzy et S. Nasser Eddine, “*Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un PC*”, mémoire de Master. Département de génie électrique

option micro-informatique et instrumentation. Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 2010.

[25] J. Graham, “*CES 2017: Cars, robots are expected to star*”. USA TODAY, 2017.

[26] J. J. Crago “*Introduction to Robotics Mechanics and Control*”, 3^{ed}: Prentice Hall, 2005.

[27] A. Isma “*Elaboration d'une stratégie de coordination de mouvements pour un manipulateur mobile redondant*”. Mémoire de Magister, faculté d'électronique et d'informatique. Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger (Algérie), 2007.

[28] La Robotique en FGA. Les engrenages. [Consulté le : 11 septembre 2019]. Disponible sur : <https://sites.google.com/site/robotiquefga/sctech/engrenages-roues-dentees>

[29] M. A. Rashidifar, A. A. Rashidifar, D. Ahmadi, “*Modeling and Control of 5 DOF Robots Arm Using Fuzzy Logic Supervisory Control*”, IJRA, Vol. 2, n° 2, p. 56-68, Jun 2013.

[30] H. Rabouhi “*Polycopié de cours sur la Mécanique du point*”, Université A. MIRA-Bejaia.

[31] S. BORSALI. “*Polycopié de cours Modélisation des Robots*”. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2012.

[32] W. Khalil, E. Dombre “*Modeling Identification and Control of Robots*”, Butterworth, Heinemann, 2004.

[33] Arduino. Arduino Uno rev3. [En ligne]. [Consulté le : 17 septembre 2019]. Disponible sur : <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

[34] B. Lionel, *Mécatronique cours avec exercices corrigés*, Dunod, Paris 5^{me} Laromiguière 75005, 2016.

[35] Carlos Valente, *L'éditeur ISIS*. Département génie électrique et informatique industrielle 19100 Brive la gaillarde, Limoges, France, version du 22/09/2005.