

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

Sadaoui Amina

Hamdi Narimane

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Conception et réalisation d'un bras manipulateur à quatre degré de liberté

Soutenu le 24 /06 /2024 devant le jury composé de :

M ^{me} Riache	Samah	MCA	UMBB	Président
Mr. Belhabchia	Malik	MCA	UMBB	Examineur
M ^{me} Azzougui	Safia	Doctorante	UMBB	Rapporteur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu pour ce qu'il nous a donné comme force afin d'effectuer ce travail.

On exprime nos profonds remerciements à Madame **AZZOUGUI SAFIA** pour nous avoir permis de mener à bien ce projet et pour nous avoir encadré avec efficacité. On vous remercie sincèrement de tout notre cœur.

Merci pour votre patience inébranlable, votre aide sans limite, et votre disponibilité sans relâche sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Vous nous avez soutenu jusqu'à la dernière minute, un soutien et une attention qu'on oublierait jamais. On vous exprime ici toute notre gratitude et notre reconnaissance envers tout ce que vous avez fait pour la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos plus vifs remerciements sont également adressés à l'ensemble des enseignants du Département Ingénierie des Systèmes Embarqués de la Faculté de technologie, UMBB.

On adresse également un grand merci à tous nos chers amis et à toutes les personnes qui ont participé près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, ce projet n'aurait pas pu être accompli sans le soutien de nos parents et de toutes les personnes qui nous ont aidés. Nous leur exprimons simplement notre gratitude.

Sadaoui Amina

Hamdi Narimane

Je dédie ce travail :

A ma chère mère 'Malika'

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon chère père 'Omar'

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes chers 'frères' et 'sœurs'

A mes chers frères **Nourddine** et **Yacine** et mes sœurs **Meriem** et **khadidja**

A tous les membres de ma grande famille

A **ma grand-mère**, que dieu te garde pour nous, à mes chères tantes **Nadia** et **Djamila**

A ma chère 'binôme'

Sans oublier ma chère binôme **Narimane** pour son soutien moral sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Je vous aime beaucoup

Sadaoui Amina

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU.

Avec tous mes sentiments de respect et de reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie :

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin, la première personne à soutenir mes ambitions ma moitié, ma mère "*SAIDA*".

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie qui était toujours à mes côtés pour me soutenir. A mon cher père "*AMAR*".

A mon cher frère "*BILLEL*". ma force, à la prunelle de mes yeux, à celui qui a rêvé ce jour, que dieu te garde pour nous.

A mes sœurs "*HADIL, FERIEL ET RAMA*" qui n'ont pas cessés de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.

A mes petits anges "*WASSIM, NAÏME ET AMIS*".

A mes copines d'amours "*IKRAM*" et "*AMINA*".

A mes meilleurs, *familles* et *amis*.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Hamdi Narimane

ملخص

في هذا المذكرة، نركز على تصميم وتنفيذ نموذج لذراع روبوتية بأربع درجات حرية. إنها هيكل ميكانيكي يتحرك بواسطة محركات سيرفو ويتم التحكم فيه عبر بطاقة Arduino باستخدام مستشعر الأشعة تحت الحمراء لاكتشاف وجود الأجسام في مساحة عمل الذراع.

تم التحكم في وضع محركات السيرفو باستخدام طريقة التحكم pid (النسبي-التكاملي-التفاضلي) المنفذة في واجهة MATLAB SIMULINK

الكلمات الرئيسية: ذراع روبوتية، أردوينو , matlab simulink , pid , محرك سيرفو

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la conception et la réalisation d'un prototype de bras manipulateur à quatre degrés de liberté. Il s'agit d'une structure mécanique entraînée par des servomoteurs et contrôlée par la carte Arduino en utilisant un capteur infrarouge pour détecter la présence d'un objet dans le lieu de travail de notre bras.

On a utilisé une commande en position des servomoteurs dans l'interface 'MATLAB SIMULINK', il s'agit d'une commande PID (commande classique).

Mots clés : Bras manipulateur, Arduino, PID ,MATLAB SIMULINK, Servomoteur

Abstract

In this thesis, we focus on the design and implementation of a prototype of a four-degrees-of-freedom robotic arm. It is a mechanical structure driven by servo motors and controlled by an Arduino board using an infrared sensor to detect the presence of objects in the arm's workspace. Position control of the servo motors was achieved using the PID (Proportional-Integral-Derivative) control method implemented in the MATLAB SIMULINK interface.

Keywords: Robotic arm, Arduino, PID, MATLAB SIMULINK, Servo moto

Table Des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 :Notions de base sur la robotique	
1.1. Introduction	3
1.2. Historique	3
1.3. Catégories de robots industriels	8
1.3.1. La robotique domestique	8
1.3.2. La robotique humanoïde	8
1.3.3. Les drones.....	9
1.3.4. La robotique militaire	9
1.3.5. La robotique agricole.....	10
1.3.6. La robotique industrielle.....	10
1.4. Les différents types de robots.....	11
1.4.1. Les robots SCARA	11
1.4.2. Les robots cylindriques.....	11
1.4.3. Les robots sphériques	11
1.4.4. Les robots Cartésiens.....	12
1.5. Architecture des robots.....	12
1.5.1. La base	13
1.5.2. Le porteur	13
1.5.2.1. Segment.....	13
1.5.2.2. Articulation	13
1.5.3. L'actionneur.....	14
1.5.4. L'organe terminal	15
1.6. Structure mécanique d'un robot	15
1.7. Classification des robots	15
1.7.1. Les télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle	16
1.7.2. Les manipulateurs automatiques à cycles prééglés	16
1.7.3. Les robots programmables.....	17
1.7.4. Les robots intelligents.....	17
1.8. Types de bras manipulateurs	18

1.9. Conclusion.....	20
----------------------	----

Chapitre 2 :Modélisation mathématique

2.1. Introduction	21
2.2. Modélisation géométrique.....	21
2.2.1. Modèle géométrique direct (MGD)	21
2.2.1.1. Calcul du modèle géométrique direct de notre bras en utilisant les paramètres de D-H	22
2.2.1.2. Test du modèle géométrique direct de notre bras sous MATLAB	26
2.2.2. Modèle géométrique inverse (MGI)	29
2.2.2.1. Calcul du modèle géométrique inverse de notre bras	29
2.2.2.2. Test du modèle géométrique inverse de notre bras sous MATLAB.....	34
2.3. Modélisation cinématique	34
2.3.1. Modèle cinématique direct (MCD).....	34
2.3.2. Modèle cinématique inverse (MCI).....	35
2.4. Modélisation du moteur à courant continu.....	36
2.4.1. Les équations électromécaniques	36
2.4.2. Modèle d'état du moteur.....	37
2.5. Conclusion.....	39

Chapitre 3: Matériels et réalisation

3.1. Introduction	40
3.2. Matériel utilisé.....	40
3.2.1. La carte Arduino	40
3.2.1.2. Les composants principaux d'une carte Arduino.....	42
3.2.2. Les servomoteurs (actionneurs).....	43
3.2.2.1. Les composants principaux d'un servomoteur.....	44
3.2.2.2. Les connaissances nécessaires au pilotage d'un servomoteur	45
3.2.3. Les fils de connexion.....	45
3.2.4. Régulateur de tension	46
3.2.5. Câble d'alimentation.....	47
3.2.6. Plaque d'essai	47
3.2.7. Capteur infrarouge.....	48

3.3. Les logiciels.....	50
3.3.1. Logiciel ISIS (Intelligent Schematic Input System).....	50
3.3.1.1. Présentation de logiciel	50
3.3.1.2. Les étapes suivies pour créer des schémas électriques	50
3.3.1.3. La simulation de notre bras manipulateur sur ISIS Proteus.....	52
3.3.2. Logiciel de programmation Arduino	52
3.4.1. Les étapes suivies pour créer notre code Arduino	53
3.5. La réalisation de bras.....	53
3.5.1. Etude socio-économique.....	53
3.5.2. Organigramme	54
3.5.3. Le Grafcet de notre système	55
3.5.4. Les photos de la réalisation	56
3.6. La commande PID.....	57
3.6.1. Régulateur PID	57
3.6.1.1. L'action proportionnel	58
3.6.1.2. L'action intégrale	59
2.6.1.3. L'action dérivé	60
3.6.1.4. Simulation sous MATLAB SIMULINK de contrôleur PID.....	61
3.7. Conclusion.....	64
Conclusion générale	65

Liste des figures

Chapitre 1 : Notions de base sur la Robotique

FIGURE1. 1. ROBOT UNIMATE.	4
FIGURE1. 2. BRAS A ENTRAINEMENT DIRECT.....	4
FIGURE1. 3. ROBOT ASIMO.	5
FIGURE1. 4. SILVER ARM ROBOT.....	5
FIGURE1. 5. ASPIRATEUR ROOMBA.....	6
FIGURE1. 6. LES GAMMES DE ROBOTS A TRAVERS LE TEMPS.	6
FIGURE1. 7. ROBOT (COBOT). FIGURE1. 8. DRONE DE LIVRAISON.....	7
FIGURE1. 9. VEHICULE AUTONOME.	7
FIGURE1. 10. EXEMPLE DE ROBOTIQUE DOMESTIQUE, (A) : NETTOYEUR PISCINE, (B) : ROBOT DE TONTE, (C) : ASPIRATEUR.....	8
FIGURE1. 11. ROBOT HUMANOÏDE.....	9
FIGURE1. 12. ROBOTS MILITAIRES.	9
FIGURE1. 13. ROBOTIQUE AGRICOLE (VEGETALE). FIGURE1. 14. ROBOTIQUE AGRICOLE (ANIMALE).	10
FIGURE1. 15. ROBOTIQUE INDUSTRIELLE.	11
FIGURE1. 16. BRAS MANIPULATEUR (ROBOT SCARA(SANKYO)).	11
FIGURE1. 17. BRAS MANIPULATEUR (ROBOT CYLINDRIQUE(SEIKO)).....	11
FIGURE1. 18. BRAS MANIPULATEUR (ROBOT SPHERIQUE(FANUC)).....	12
FIGURE1. 19. BRAS MANIPULATEUR (ROBOTS CARTESIEN(TOSHIBA)).....	12
FIGURE1. 20. ARCHITECTURE D'UN ROBOT.	13
Figure1. 21. Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes.	14
FIGURE1. 22. REPRESENTATION D'UNE ARTICULATION PRISMATIQUE SOUS SES DIFFERENTS FORMES.....	14
FIGURE1. 23. DIFFERENTES STRUCTURES DES ROBOTS, (A) : CHAINE SIMPLE OUVERTE, (B) : CHAINE ARBORESCENTE, (C) : CHAINE FERMEE	15
FIGURE1. 24. MANIPULATEURS A COMMANDE MANUELLE.	16
FIGURE1. 25. MANIPULATEURS AUTOMATIQUES A CYCLES PREREGLES.	17
FIGURE1. 26. ROBOT PROGRAMMABLE.....	17
FIGURE1. 27. ROBOT INTELLIGENT.....	18
FIGURE1. 28. ROBOT RRRR.....	18
FIGURE1. 29. ROBOT RRP.....	19

FIGURE1. 30. ROBOT RPR.....	19
FIGURE1. 31. ROBOT RPP.	20
FIGURE1. 32. ROBOT PPP.....	20

Chapitre 2 : Modélisation Mathématique

FIGURE 2. 1 PLACEMENT DES REPERES DU BRAS REALISE.....	24
FIGURE 2.2. INTERFACE MATLAB.	27
FIGURE 2.3. CONSTRUCTION DE NOTRE BRAS SUR MATLAB.	27
FIGURE 2. 4 MATRICE DE TRANSFORMATION HOMOGENE	29
FIGURE 2. 5. LE MODELE GEOMETRIQUE DIRECT	29
FIGURE 2. 6. TYPE D'EQUATION RENCONTREE AVEC LA METHODE PAUL.	31
FIGURE 2. 7. LE MODELE GEOMETRIQUE INVERSE.	34
FIGURE 2. 8. ROBOT PLAN DE NOTRE BRAS MANIPULATEUR.	35
FIGURE 2. 9. SCHEMA DU MOTEUR A COURANT CONTINU.	36
FIGURE 2. 10. SCHEMA FONCTIONNEL DU MOTEUR A COURANT CONTINU.	38

Chapitre 3 : Matériels et réalisation

FIGURE 3. 1.ARDUINO UNO.....	41
FIGURE 3. 2. ARDUINO UNO.....	43
FIGURE 3. 3. SERVOMOTEUR SG90.....	44
FIGURE 3. 4. SIGNAL DE COMMANDE POUR UN SERVOMOTEUR.....	45
FIGURE 3. 5. LES FILS DE CONNEXION.....	46
FIGURE 3. 6. REGULATEUR DE TENSION LM2596.....	47
FIGURE 3. 7. CABLE D'ALIMENTATION.	47
FIGURE 3. 8. PLAQUE D'ESSAI ELECTRONIQUE.....	48
FIGURE 3. 9. CAPTEUR INFRAROUGE.	48
FIGURE 3. 10. INTERFACE DE PROTEUS.....	50
FIGURE 3. 11. LES ETAPES A SUIVRE POUR TRACER UN SCHEMA ELECTRIQUE.....	51
FIGURE 3. 12. SIMULATION DE LA COMMANDE DU NOTRE BRAS MANIPULATEUR.	52
FIGURE 3. 13. L'INTERFACE DE LOGICIEL ARDUINO.	53
FIGURE 3. 14. LE GRAFCET DU FONCTIONNEMENT DE NOTRE BRAS MANIPULATEUR.	55
FIGURE 3. 15. LA REGULATION DE LA TENSION D'ALIMENTATION.	56
FIGURE 3. 16. VUE LATERALE DU BRAS EN POSITION DE MANTIEN, (B) VUE LATERALE DU BRAS EN POSITION DE DEPOT.	56
FIGURE 3. 17. VUE DE FACE DE BRAS EN POSITION DE MANTIEN.	57
FIGURE 3. 18. VUE DE FACE DE BRAS EN POSITION INITIALE.	57
FIGURE 3. 19. ASSERVISSEMENT AVEC REGULATEUR PID.	58
FIGURE 3. 20. LA REPONSE DE L'ACTION PROPORTIONNELLE A ECHELON.	59
FIGURE 3. 21. LA REPONSE DE L'ACTION INTEGRALE A ECHELON.	60

FIGURE 3. 22. LA REPOSE DE L'ACTION DERIVE A ECHELON.....	61
FIGURE 3. 23. LES PARAMETRES ET LES VALEUR DU MCC.....	61
FIGURE 3. 24. PREMIERE SIMULATION DU REGULATEUR PID.....	62
FIGURE 3. 25. DEUXIEME SIMULATION DE REGULATEUR PID.....	62
FIGURE 3. 26. RESULTAT DE SIMULATION : (A) 1 ^{ER} MOTEUR, (B) 2EME MOTEUR, (C) 3EME MOTEUR ET (D) 4EME MOTEUR.	63

Liste des tableaux

Chapitre 2 : Modélisation Mathématique

TABLEAU 2. 1. LES CARACTERISTIQUES DU ROBOT REALISE.	23
TABLEAU 2. 2. LES PARAMETRES DE DENAVIT-HARTENBERG DU BRAS REALISE.	24

Chapitre 3 : Matériels et réalisation

TABLEAU 3. 1. SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DE L'ARDUINO UNO.	41
TABLEAU 3. 2. ETUDE SOCIO-ECONOMIQUE.	54

Liste des abréviations

DDL : degré de liberté.

MGD : le modèle géométrique direct.

MGI : le modèle géométrique inverse.

MCD : le modèle cinématique direct.

MCI : le modèle cinématique inverse.

DH : DEVANIT-HARTENBERG

MTH : matrice de transformation homogène.

MCC : moteur à courant continu.

IR : infrarouge.

ISIS : intelligent schematic input system.

PID : proportional intégral dérivateur

Introduction générale

Introduction générale

Depuis des siècles, l'homme a voulu concevoir des appareils capables de l'imiter afin d'exécuter des tâches difficiles à sa place, en particulier dans les environnements hostiles. Les robots incarnent cette ambition dans diverses opérations. Ils peuvent intervenir dans des milieux dangereux, soulever des matériaux lourdes et les déplacer.

La robotique est aujourd'hui un domaine tendance qui révolutionne de nombreux secteurs, surtout industriels. Depuis ses débuts, la robotique a évolué pour intégrer des technologies allant des systèmes mécaniques simples aux systèmes autonomes et intelligents.

Parmi les différentes innovations dans ce domaine, on trouve les bras manipulateurs qui se distinguent par leur pouvoir à effectuer diverses tâches de manière répétitive et précise. Leur conception et leur réalisation font appel à des connaissances pluridisciplinaires en mécanique, en électronique ainsi qu'en informatique avec l'utilisation d'une carte électronique comme plateforme de contrôle qui offre une flexibilité et une facilité de programmation essentielles à la réalisation de ce système.

L'objectif principal de notre mémoire est d'explorer la conception et la réalisation d'un bras manipulateur à quatre degrés de liberté (DDL) de type : quatre articulations rotoïdes, commandé par une carte électronique de type Arduino, capable de détecter et de déplacer des objets de manière autonome en détectant leur présence grâce à un capteur infrarouge.

L'ajout d'un capteur infrarouge permet au bras manipulateur d'interagir de façon autonome avec son environnement en détectant la présence d'objets. De plus, la modélisation mathématique du bras, en particulier les modèles géométriques direct (MGD) et inverse (MGI), renforce la précision et la fiabilité des mouvements du robot.

La partie mécanique du bras manipulateur sera dimensionnée pour répondre à des critères de précision et de répétabilité. Le choix des actionneurs (servomoteurs) se fera en fonction des spécifications de couple requises. Une commande PID sera implémentée pour asservir la position de chaque articulation et garantir une réponse dynamique stable.

La partie électronique reposera sur une carte Arduino qui assurera l'interfaçage entre les différents composants (servomoteurs, capteurs) et le programme de commande.

Pour mener à bien ce projet, nous avons organisé ce présent mémoire en trois chapitres : Le premier chapitre comportera les notions de bases de la robotique, le deuxième chapitre contiendra la modélisation mathématique ainsi que son test sous MATLAB. Enfin, le dernier chapitre présentera le noyau du mémoire, la conception et réalisation de notre bras manipulateur commandé par une carte électronique Arduino.

Chapitre I

Notions de base sur la robotique

1.1. Introduction

Un robot représente un système mécatronique, combinant mécanique, électronique et informatique, pour exécuter une variété de tâches de manière automatique. Il s'agit d'une machine intelligente opérationnelle qui requiert une capacité de mouvement autonome.

La robotique est un domaine fascinant et en constante évolution qui représente le croisement entre la technologie, l'ingénierie et la créativité humaine importante dans le domaine de l'automatisation, souvent en imitant les actions humaines. Depuis leurs modestes débuts dans les chaînes de production industrielles jusqu'à leur présence dans les maisons, hôpitaux et espaces extraterrestres, les robots ont dépassé leur statut de simples outils pour devenir des aides, des assistants et même des interlocuteurs [1].

Les notions de base en robotique sont essentielles pour comprendre les principes de conception et de fonctionnement des robots, en particulier dans le cadre de la réalisation de notre bras manipulateur à quatre degrés de liberté (DDL). Ce chapitre traite donc les fondements de la robotique, en explorant son historique, son évolution au fil du temps, les divers domaines où elle est utilisée, ainsi que d'autres aspects essentiels de ce domaine fascinant.

1.2. Historique

L'existence de la robotique se rapporte à l'existence de l'humain et à sa volonté de développer des outils simplifiant les activités quotidiennes.

- **En 1920 :** Le mot « robot » a été utilisé pour la première fois dans la pièce « R.U.R. (Rossum's Universal Robots) » de l'écrivain tchèque Karel Čapek.
- **En 1938 :** Willard V. Pollard dépose une demande de brevet pour l'intervention du « dispositif de contrôle de position » intégrant des commandes électroniques ainsi que des moteurs entraînant six axes de mouvement.
- **En 1948 et 1949 :** William Gray Walter développe le premier robot électronique à comportement complexe au Burden Neurological Institute de Bristol, en Angleterre.

- **En 1954 :** George Devol invente le premier robot programmable à commande numérique qui représente le fondement de l'industrie robotique moderne, nommé Unimate [2], représenté dans la figure 1.1 [3].



Figure 1.1. Robot Unimate.

- **En 1961 :** L'Unimate est installé dans une usine General Motors pour manipuler des pièces de métal chaud, marquant le début de l'utilisation commerciale des robots industriels.
- **En 1980 :** le premier « bras à entraînement direct » a été développé par Takeo Kanade [4], représenté sur la figure 1.2.



Figure 1.2. Bras à entraînement direct.

- **En 1986 :** Honda lance le projet de développement d'un robot humanoïde, aboutissant finalement au robot ASIMO en 2000 représenté sur la figure 1.3 [5].



Figure 1.3. Robot ASIMO.

- **En 1994 :** Silver Arm est conçu par David Silver, qui peut effectuer des mouvements qui ressemblent beaucoup à ceux d'une main humaine, représenté sur la figure 1.4 [6].

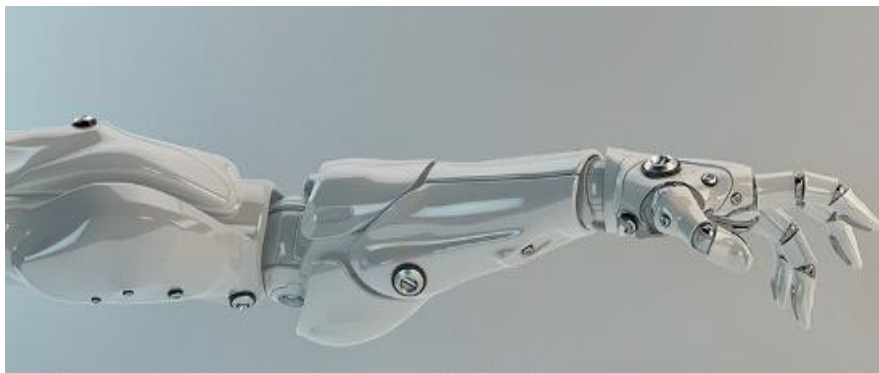


Figure 1.4. Silver Arm robot.

- **En 2002 :** Le robot aspirateur Roomba, représenté dans la figure 1.5 [7], est lancé pour la première fois par la société iRobot [3].



Figure 1.5. Aspirateur Roomba.

- **En 2010 :** Grâce au système da Vinci, le développement de la robotique chirurgicale permet d'effectuer des interventions chirurgicales minimalement invasives avec une plus grande précision.

La figure 1.6 représente les gammes de robots à travers le temps [8].

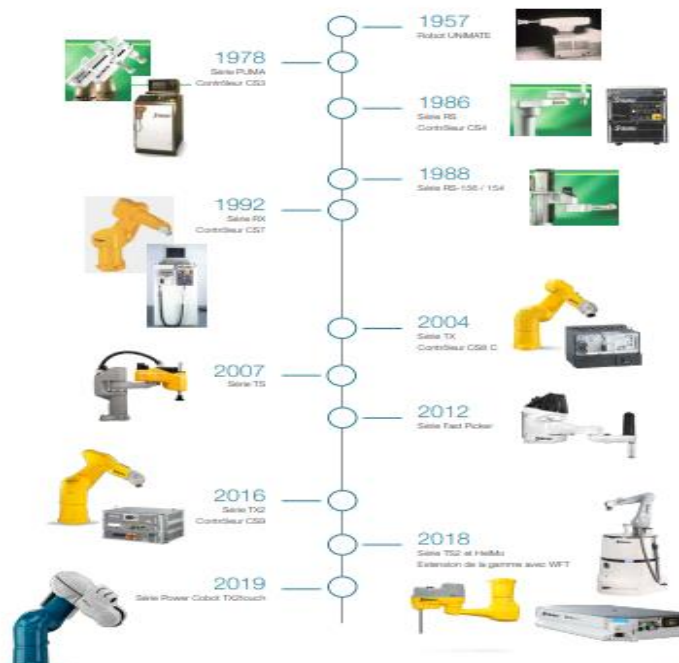


Figure 1.6. Les gammes de robots à travers le temps.

Tendances actuelles : de nos jours, l'utilisation de la robotique ne fait que croître de manière significative. Les robots modernes utilisent maintenant des méthodes d'intelligence artificielle (IA) qui leur permettent d'effectuer des tâches plus complexes et d'apprendre de nouvelles compétences de manière autonome [9]. Les collaboratives robots (Cobots) sont conçus pour travailler aux côtés des êtres humains, améliorant ainsi la productivité et la sécurité [10]. Dans des secteurs comme la santé, l'hôtellerie et les services à domicile, les robots de service sont de plus en plus utilisés pour aider dans les tâches quotidiennes et fournir un soutien personnalisé. La robotique autonome, incluant les véhicules autonomes, les drones de livraison et les robots explorateurs, représente une avancée majeure, capable de naviguer et de prendre des décisions sans le besoin de l'intervention humaine directe [11]. La figure 1.7 [12] montre un robot (cobot), la figure 1.8 [13] présente un drone de livraison et la figure 1.9 [14] véhicule autonome.



Figure 1.7. Robot (cobot).



Figure 1.8. Drone de livraison.



Figure 1.9. Véhicule autonome.

1.3. Catégories de robots industriels

Il existe différentes catégories de robots qui nous entourent, nous pouvons mentionner quelques-unes [8].

1.3.1. La robotique domestique

Les robots domestiques sont largement utilisés pour diverses tâches ménagères, comme le nettoyage avec un aspirateur robot, l'entretien des piscines ou la tonte de la pelouse. Ce type de robot est ainsi omniprésent dans notre vie quotidienne et est l'un des plus couramment utilisés par rapport à d'autres catégories de robots. La figure (a) [15] montre un nettoyeur de piscine, la figure (b) [16] présente un robot de tonte et la figure (c) illustre un aspirateur robot.



(a)

(b)

(c)

Figure 1.10. Exemple de robotique domestique, (a) : Nettoyeur piscine, (b) : Robot de tonte, (c) : Aspirateur.

1.3.2. La robotique humanoïde

Les robots humanoïdes, illustrés dans la figure 1.11, sont des robots qui ressemblent à la forme humaine [17]. Un robot humanoïde est généralement constitué d'une tête, d'un torse avec deux bras et deux jambes. Il existe également d'autres types qui ne contiennent parfois que la partie supérieure du corps et sont posés sur une surface mobile. Ils sont conçus pour de nombreux usages, notamment :

- Fonctionnels : Ils servent d'outils de support et d'interaction humaine avec l'environnement, en particulier dans les applications de transport de charges lourdes.
- Expérimentaux : Par exemple, recherche sur la locomotion [8].



Figure 1.11. Robot humanoïde.

1.3.3. Les drones

Les drones sont des avions sans pilote que nous pouvons contrôler et programmer à distance, leurs permettant de se déplacer de manière autonome.

Il en existe différents types : drones civils, drones militaires, drones sous-marins, drones agricoles [8].

1.3.4. La robotique militaire

Les robots militaires ont véritablement pris leur envol pendant la Seconde Guerre mondiale, lorsque les grandes puissances cherchaient à minimiser les risques pour les soldats. Ils ont été développés pour diverses applications, telles que la surveillance, le déminage, et bien d'autres [8], illustrés dans la figure 1.12 [18].



Figure 1.12. Robots militaires.

1.3.5. La robotique agricole

Ces types de robots ont été fabriqués spécifiquement pour faciliter les activités agricoles de toutes sortes et ont été conçus pour s'adapter à tous les types d'opérations agricoles dans les deux domaines :

- Le domaine de la production animale, illustrés dans la figure 1.13 (a) [19].
- Le domaine de la production végétale, illustrés dans la figure 1.13(b) [20].



(a)



(b)

Figure 1.13. Exemple de robotique agricole (a) Robotique végétale, (b) animale.

1.3.6. La robotique industrielle

Un robot industriel est défini par l'organisation internationale de normalisation (ISO) comme un manipulateur multifonctionnel reprogrammable, à commande automatique et programmable sur trois axes ou plus. L'industrie a été l'un des premiers secteurs à adopter la robotisation, permettant d'automatiser les lignes de production pour une plus grande flexibilité. La robotique industrielle est illustrée dans la figure 1.14 [21].



Figure 1.14. Robotique industrielle.

1.4. Les différents types de robots

1.4.1. Les robots SCARA (Selective Compliance Articulated Robot for Assembly) Ce type de robot à la fois précis et rapide, est utilisé dans l'assemblage. C'est un robot à 3 axes série (RRT), 3 degrés de liberté, son espace de travail est cylindrique [22], illustrés dans la figure 1.15 [23].

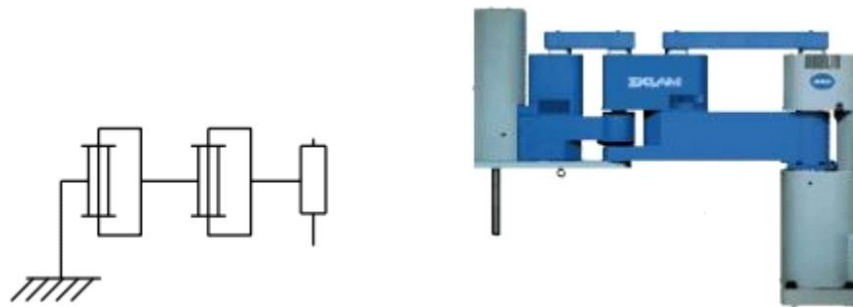


Figure 1.15. Bras manipulateur (robot SCARA(Sankyo)).

1.4.2. Les robots cylindriques

Ce type de robots est caractérisé par une rapidité et un espace de travail cylindrique. C'est un robot à 3 axes, série (RTT) et 3 degrés de liberté, son espace de travail est cylindrique [22], illustrés dans la figure 1.16 [23].



Figure 1.16. Bras manipulateur (robot cylindrique(Seiko)).

1.4.3. Les robots sphériques

Ce sont des robots à 3 axes, série RRT, et 3 degrés de libertés, leurs espaces de travail est sphérique. Ils sont caractérisés par leur grande charge utile [22], illustrés dans la figure 1.17 [23].

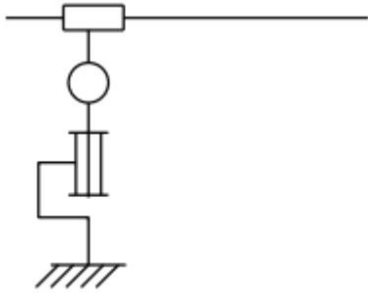


Figure 1.17. Bras manipulateur (robot sphérique(Fanuc))

1.4.4. Les robots Cartésiens

Ce sont des robots à 3 axes perpendiculaires 2 à 2, série, TTT, et 3 degrés de liberté et caractérisés par leur Très bonne précision, mais ils sont lents [22].

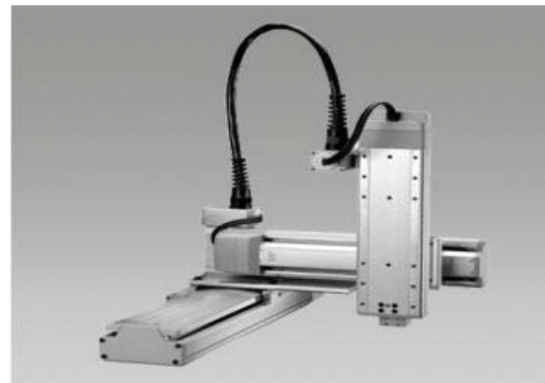
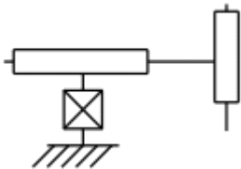


Figure 1.18. Bras manipulateur (robots cartésien(Toshiba))

1.5. Architecture des robots

Un robot est composé de divers éléments comme le montre la figure 1.19 [24].



Figure 1.19. Architecture d'un robot.

1.5.1. La base

La base de presque tous les robots industriels est fermement connectée au lieu de travail [25].

1.5.2. Le porteur

Le porteur représente le composant principale d'un système mécanique articulé, se compose d'un segment, d'une articulation, d'un actionneur et d'un élément d'extrémité, son rôle principal réside dans le positionnement de l'élément d'extrémité en fonction de la situation spécifique [25], il est constitué de :

1.5.2.1. Segment

Ce sont des corps solides qui se déplacent par rapport à la base du support et les unes par rapport aux autres [25].

1.5.2.2. Articulation

Une articulation est la connexion qui existe entre deux corps successifs en restreignant le nombre de degrés de liberté entre eux et il existe deux types des articulation (articulation rotoïde et l'articulation prismatique) [25].

A. Articulation rotoïde

C'est un joint tournant marqué (R) sa mission est de limiter le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun, grâce auquel la position relative entre les deux corps est déterminée par l'angle autour de cet axe, comme le montre la figure 1.20 [25].

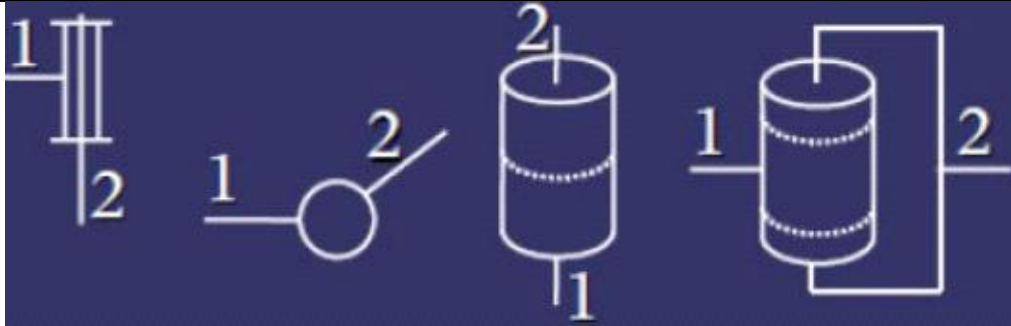


Figure 1.20. Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes.

B. Articulation prismatique

C'est un connecteur coulissant noté par P sa mission est de limiter le mouvement entre deux corps à une translation au long d'un axe commun, grâce auquel la position relative entre les deux corps est déterminée par la distance au long de cet axe, comme le montre la figure 1.21 [25].

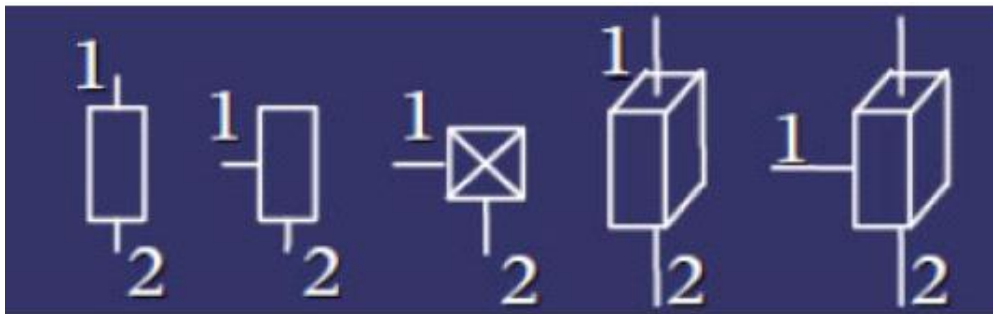


Figure 1.21. Représentation d'une articulation prismatique sous ses différentes formes.

1.5.3. L'actionneur

Pour fonctionner, la structure mécanique articulée des robots intègre souvent des moteurs reliés à des engrenages, tels que des courroies de distribution. Les actionneurs, équipés généralement de moteurs, incluent de plus en plus des moteurs à commutation électronique (sans balais) ou, pour les petits robots, des moteurs pas à pas. Pour les robots conçus pour déplacer des charges très lourdes (comme les excavatrices), les actionneurs sont souvent hydrauliques, fonctionnant soit en mode translation (vérin hydraulique), soit en mode rotatif (moteur hydraulique). Les pneus sont utilisés pour des applications générales dans les manipulateurs polyvalents. Le Cycle Manipulateur est une conception mécanique articulée avec un nombre limité de degrés de liberté, permettant une séquence de mouvements contrôlés grâce aux capteurs de fin de course, qui peuvent être réglés manuellement pour atteindre la position souhaitée [25].

1.5.4. L'organe terminal

L'organe terminal est le dispositif situé à l'extrémité d'un robot, il lui permet d'effectuer des actions physiques et d'interagir avec les objets ou les surfaces autour de lui. Par exemple, pour un bras robotique, l'organe terminal peut être une pince, une ventouse, ou tout autre outil spécifique permettant de saisir, déplacer ou manipuler des objets [25].

1.6. Structure mécanique d'un robot

Une structure mécanique articulée, comme celle d'un bras manipulateur, est généralement constituée de plusieurs segments rigides appelés liens ou corps, qui sont connectés entre eux par des articulations. Ces articulations permettent les mouvements relatifs entre les liens. Une telle structure mécanique peut se présenter sous différentes formes : [26]

- **Une chaîne continue ouverte simple** : aucun retour mécanique d'un segment à un autre dans la chaîne (fig.1.23. a).
- **Une chaîne arborescente** : ils existent plusieurs organes terminaux qui agissent en parallèle (fig.1.23. b).
- **Une chaîne complexe ou fermée** : il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne (fig1.23. c).

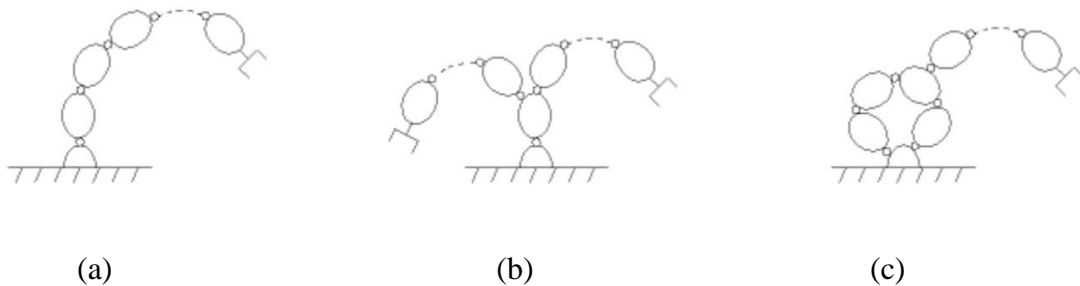


Figure 1.22. Différentes structures des robots, (a) : Chaîne simple ouverte, (b) : Chaîne arborescente, (c) : Chaîne fermée

1.7. Classification des robots

Les robots sont classés d'un point de vue fonctionnel.

1.7.1. Les télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle

Ce type se distingue par sa fonction de télécommande à courte ou longue distance à l'aide d'indicateurs mécanique, hydrauliques ou électrique, Ces manipulateurs sont utilisés dans des environnements tels que les forges, les fonderies, les ateliers de meulage et autres contextes considérés comme « hostiles ». Cependant, leur utilisation nécessite toujours la présence et l'intervention constantes de l'opérateur [27], représenté sur la figure 1.23 [28].



Figure 1.23. Manipulateurs à commande manuelle.

1.7.2. Les manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés

Ces dispositifs sont spécialement conçus pour des applications spécifiques et leurs mouvements sont limités par des points d'arrêt et les cames réglables manuellement sont contrôlées par relais, logique pneumatique ou par automate programmables [27], représenté sur la figure 1.24.

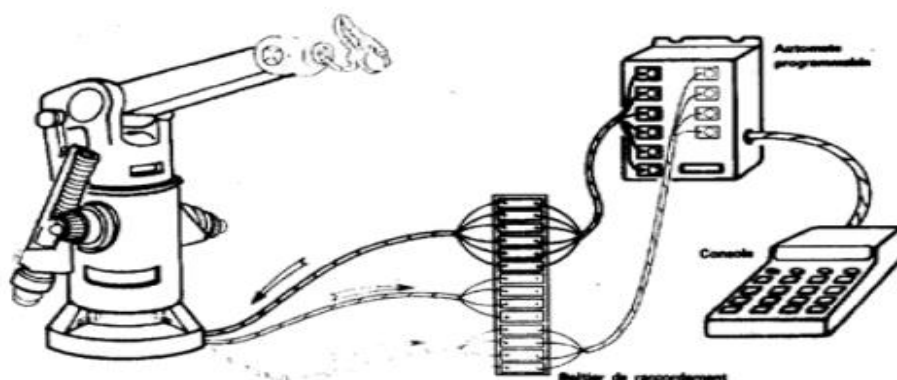


Figure 1.24. Manipulateurs automatiques à cycles prééglés.

1.7.3. Les robots programmables

Ce type est contrôlé par ordinateur ou des armoires de commande, leurs mouvements continus dans l'espace sont ensuite programmés par apprentissage ou par programmation via le clavier ou même sur l'écran de la station CAO. Effectuer des manipulations complexes telles que le soudage, l'usinage, le découpage... etc. [27], représenté sur la figure 1.25 [29].



Figure 1.25. Robot programmable.

1.7.4. Les robots intelligents

Les robots intelligents sont des systèmes robotiques dotés de capacités avancées pour pouvoir prendre des décisions autonomes et interagir avec leur environnement et avec les humains. Actuellement, la « troisième génération » des robots intelligents est dotée de capacités de réflexion grâce à l'intelligence artificielle qui fait l'objet de recherches approfondies [27], représentée sur la figure 1.26 [30].



Figure 1.26. Robot intelligent.

1.8. Types de bras manipulateurs

Il existe plusieurs types des bras manipulateurs selon la nature des articulations et la forme de l'espace de travail [31].

A. Anthropomorphe (quatre rotations)

Ce type contient 4 articulations rotoïdes comme montre la figure 1.27.

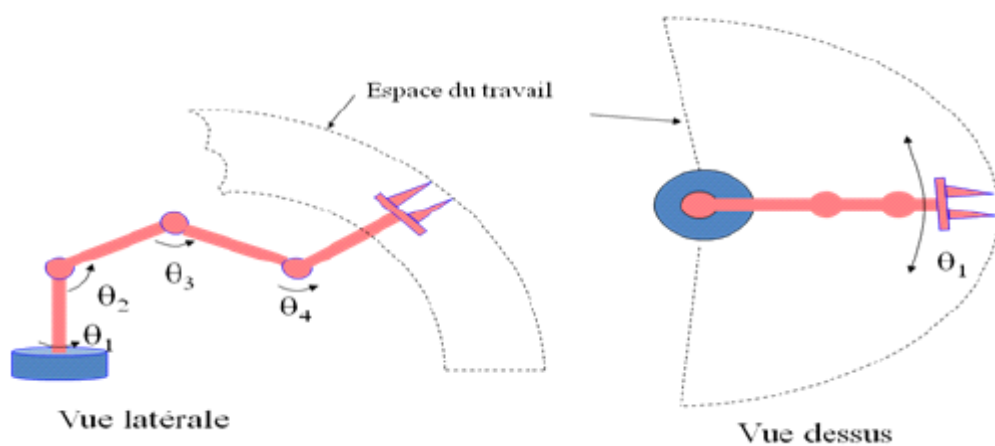


Figure 1.27. Robot RRRR.

B. Sphérique (2 rotations - 1 translation)

Ce type contient 3 articulations, 2 rotoïdes et une prismatique, comme le montre la figure 1.28.

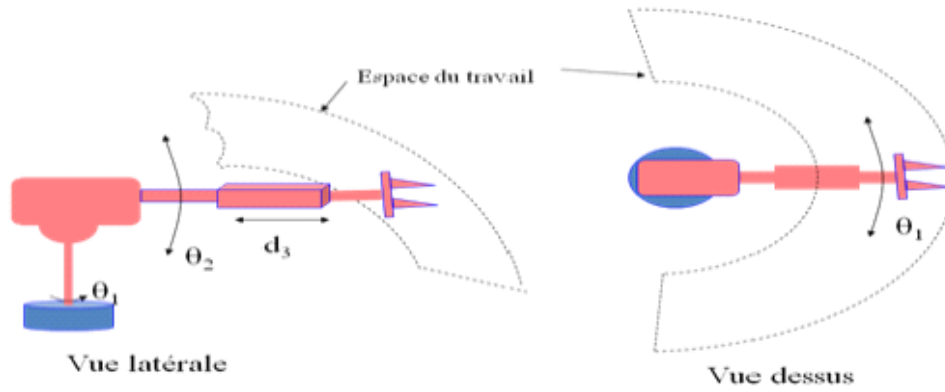


Figure 1.28. Robot RRP.

C. Torique (rotation - translation - rotation)

Ce type contient 3 articulations, 2 rotoïdes et une prismatique, comme le montre la figure 1.30

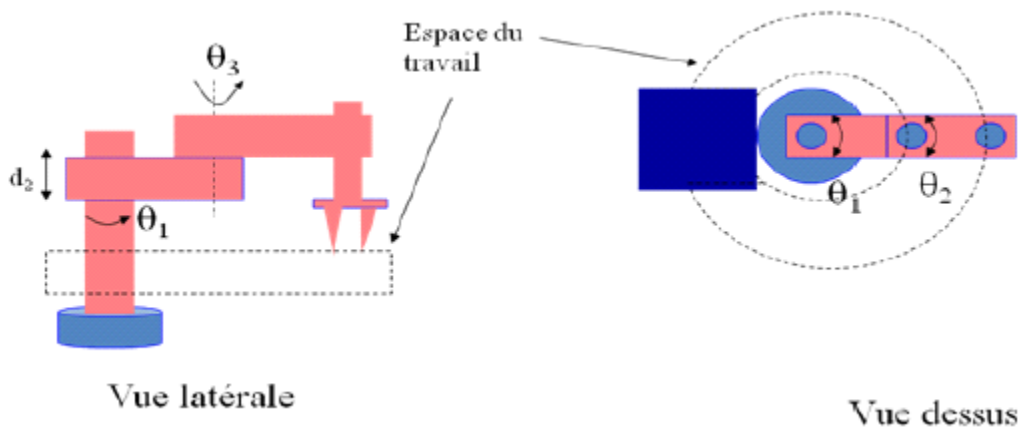


Figure 1.29. Robot RPR.

D. Cylindrique (rotation - 2 translations)

Ce type contient 4 articulations, 2 rotoïdes et 2 prismatiques, comme le montre la figure 1.30.

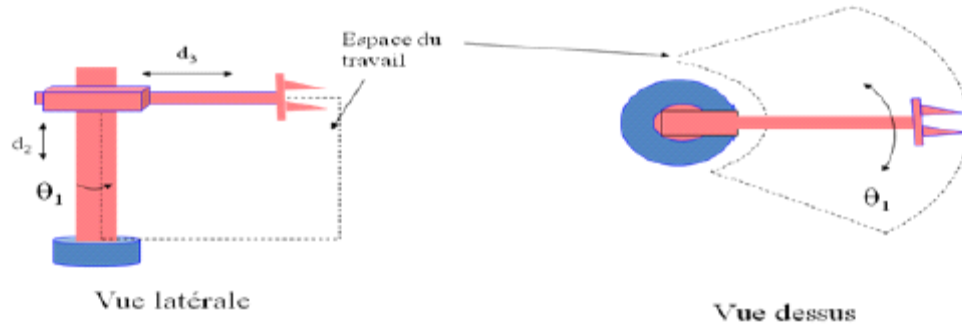


Figure 1.30. Robot RPP.

E. Cartésien (trois translations)

Ce type contient 3 articulations, les trois sont de type prismatiques, comme montré dans la figure 1.31.

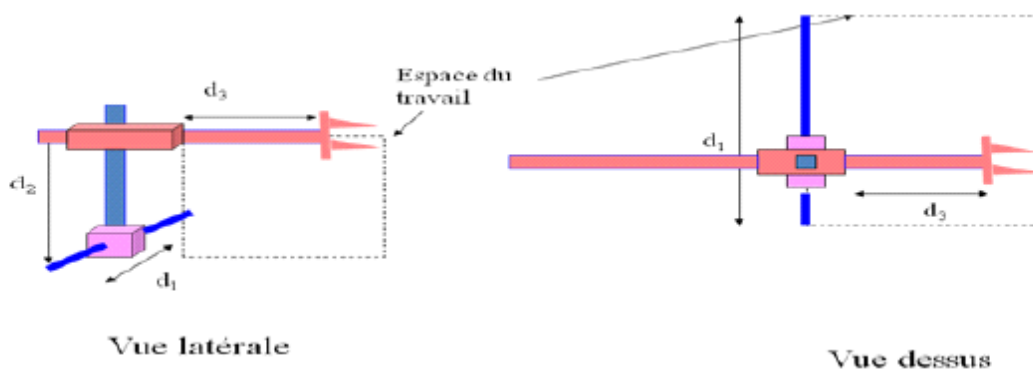


Figure 1.31. Robot PPP.

Pour notre part, nous avons choisi de créer un bras manipulateur de type Anthropomorphe (quatre rotations).

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble générale de la robotique, son historique, les catégories ainsi que les types de robotique, les éléments qui composent un robot et leur classification.

Le chapitre suivant comportera la modélisation mathématique.

Chapitre II

Modélisation mathématique

2.1. Introduction

La modélisation d'un robot, qui est un système mécanique articulé et contrôlé, consiste à créer un modèle mathématique. Ce modèle aide à la conception du robot et a de nombreuses applications, comme prédire les mouvements, adapter les actionneurs, planifier les tâches, établir les lois de commande et intégrer le robot dans des simulations informatiques, etc. [32-33].

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que : les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Parmi ces modèles, on distingue :

- **Les modèles géométriques direct et inverse** qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement.
- **Les modèles cinématiques direct et inverse** qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement.
- **Les modèles dynamiques** définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au modèle géométrique direct et inverse ainsi qu'au modèle cinématique direct et inverse car ces deux derniers sont les plus essentiels pour la planification de la trajectoire et le contrôle du bras manipulateur. [32]

2.2. Modélisation géométrique

2.2.1. Modèle géométrique direct (MGD)

Le modèle géométrique direct permet de connaître la situation du robot (position et orientation de l'outil de travail du robot OT), en fonction de sa configuration, grâce à la relation entre les coordonnées opérationnelles et les coordonnées généralisées.

Le MGD d'un robot peut être représenté par la relation suivante :

$$X = f(q)$$

- X : Vecteur [6x1] coordonnées opérationnelles (trois coordonnées pour la position, et trois pour l'orientation) exprimées par rapport au repère R_0 .

- q : Vecteur $[n \times 1]$ coordonnées généralisées, n = nombre de degré de liberté.

Le modèle géométrique direct est utile pour décrire une position et une orientation spécifiques, tandis que le modèle géométrique inverse permet de calculer les valeurs des variables articulaires requises pour atteindre cette configuration. Cette approche de modélisation trouve son utilité principalement dans deux domaines essentiels : la commande, la conception et la simulation [34-35].

➤ Les degrés de libertés

Les degrés de liberté (DOF) d'un bras manipulateur sont le nombre de mouvements indépendants que le bras peut accomplir sans être limité par des contraintes mécaniques ou de mouvement. Les DOF définissent la flexibilité et la polyvalence d'un bras manipulateur, ce qui en fait un outil essentiel dans de nombreux domaines, tels que la robotique, la mécanique et l'industrie. [35]

2.2.1.1. Calcul du MGD de notre bras en utilisant les paramètres de D-H

A. Les paramètres de DENAVIT-HARTENBERG

Les paramètres de Denavit-Hartenberg (D-H) sont presque universellement acceptées pour l'interprétation par les roboticiens, et avec un nombre limité de dimensions, la matrice de transformation de base permet le mouvement du corps du robot depuis la position correspondante jusqu'au corps qui le suit. Dans la chaîne cinématique, les corps sont considérés comme rigides et les articulations sont considérées comme idéales.

Voici les paramètres de D-H :

- ❖ α_i : L'angle de rotation entre les axe z_{i-1} et z_i correspondant à une rotation autour de l'axe x_{i-1} .
- ❖ d_i : La distance entre z_{i-1} et z_i mesurée le long de l'axe x_{i-1} .
- ❖ θ_i : L'angle de rotation entre les axes x_{i-1} et x_i correspondant à une rotation autour de l'axe z_i .
- ❖ a_i : La distance entre x_{i-1} et x_i mesurée le long de l'axe z_i .

Il est à noter que les angles sont positifs quand la rotation est dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

En termes de matrice de transformation homogène, les quatre transformations élémentaires définissant le repère R_i dans le repère R_{i-1} donnent la matrice suivante :[34]

$$T_i - 1_{T_i} = Rot(\theta_i) \times Trans(d_i) \times Trans(a_i) \times Rot(\alpha_i) . \quad (2.1)$$

B. Modélisation du bras manipulateur réalisé

Le bras manipulateur réalisé est constitué de : la base, les articulations (les servomoteurs), les segments, la pince, le rôle de cette dernière est qu'elle fait le lien entre le robot et l'environnement extérieur.

L'architecture du robot réalisée est une chaîne cinématique ouverte simple et corps rigides, relié par des liaisons appelées articulations (4 rotoïdes). Ces articulations sont pilotées par des servomoteurs contrôlés par un signal de commande. Le tableau 2.1 donne les caractéristiques du robot réalisé, le tableau 2.1 donne les caractéristiques du robot réalisé.

Le tableau représente les angles de rotation qu'on à choisir pour chaque articulation.

Tableau 2.1. Les caractéristiques du robot réalisé.

Nombre d'articulations	4
Actionneur	Servomoteurs
La base	80°
L'épaule	40°
Le code	30°
La pince	30°

Le placement des repères à chaque articulation est présenté dans la figure 2.1.

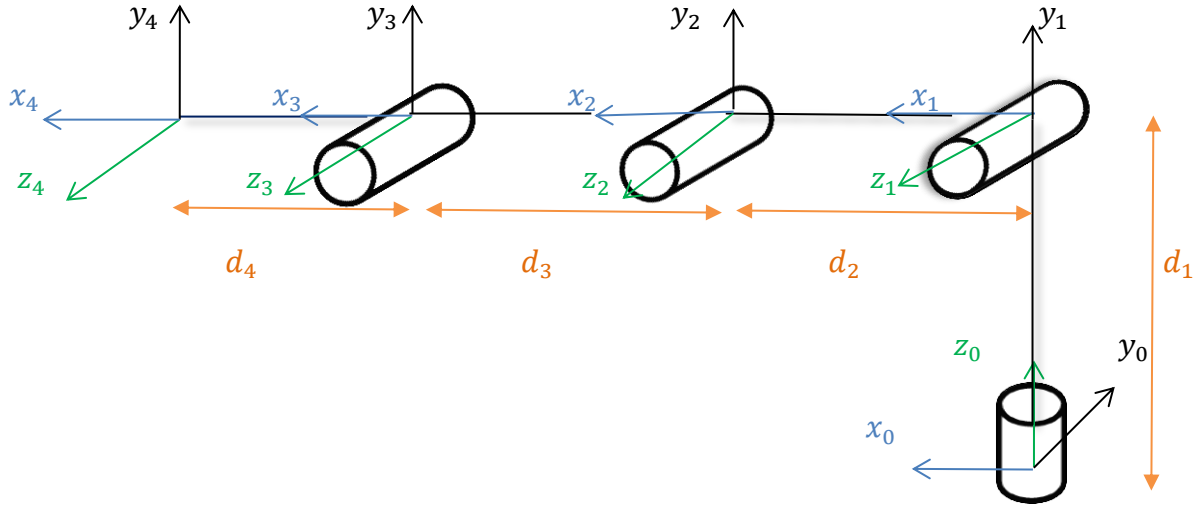


Figure 2.1. Placement des repères du bras réalisé.

Les paramètres de D-H sont présentés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Les paramètres de DENAVIT-HARTENBERG du bras réalisé.

segment	θ_i	α_i	d_i	a_i
1	θ_1	$\pi/2$	d_1	0
2	θ_2	0	0	d_2
3	θ_3	0	0	d_3
4	θ_4	0	0	d_4

L'équation (2.2) représente la matrice de transformation homogène de chaque repère.

$$T_i - 1 T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & d_i \\ C\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i & -d_i S\alpha_i \\ S\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i C\theta_i & C\alpha_i & d_i C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Le modèle géométrique direct du repère 0 au repère 1 est :

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & d_1 \\ C\alpha_1 S\theta_1 & C\alpha_1 C\theta_1 & -S\alpha_1 & -d_1 S\alpha_1 \\ S\alpha_1 S\theta_1 & S\alpha_1 C\theta_1 & C\alpha_1 & d_1 C\alpha_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Le modèle géométrique direct du repère 1 au repère 2 est :

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & d_2 \\ C\alpha_2 S\theta_2 & C\alpha_2 C\theta_2 & -S\alpha_2 & -d_2 S\alpha_2 \\ S\alpha_2 S\theta_2 & S\alpha_2 C\theta_2 & C\alpha_2 & d_2 C\alpha_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Le modèle géométrique direct du repère 2 au repère 3 est :

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & d_3 \\ C\alpha_3 S\theta_3 & C\alpha_3 C\theta_3 & -S\alpha_3 & -d_3 S\alpha_3 \\ S\alpha_3 S\theta_3 & S\alpha_3 C\theta_3 & C\alpha_3 & d_3 C\alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Le modèle géométrique direct du repère 3 au repère 4 est :

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & d_4 \\ C\alpha_4 S\theta_4 & C\alpha_4 C\theta_4 & -S\alpha_4 & -d_4 S\alpha_4 \\ S\alpha_4 S\theta_4 & S\alpha_4 C\theta_4 & C\alpha_4 & d_4 C\alpha_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & 0 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Le modèle géométrique du repère R_0 jusqu'au repère R_4 s'obtient par la multiplication successive des matrices des passages précédents. Notre modèle géométrique direct est donc :

$${}^0T_4 = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) {}^3T_4(q_4) \quad (2.7)$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} Sx & Nx & Ax & Px \\ Sy & Ny & Ay & Py \\ Sz & Nz & Az & Pz \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Après les calculs on obtient à la fin la matrice de transformations homogène finale.

- **La 1^{ère} ligne :**

$$S_x = (C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2)(C\theta_3 C\theta_4 - S\theta_3 S\theta_4) + (-C\theta_1 S\theta_2 - S\theta_1 C\theta_2)(S\theta_3 C\theta_4 + C\theta_3 S\theta_4)$$

$$N_x = (C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2)(-C\theta_3 S\theta_4 - S\theta_3 C\theta_4) + (-C\theta_1 S\theta_2 - S\theta_1 C\theta_2)(-S\theta_3 S\theta_4 + C\theta_3 C\theta_4).$$

$$A_x = 0.$$

$$P_x = d_1.$$

- **La 2^{ème} ligne :**

$$S_y = 0.$$

$$N_y = 0.$$

$$A_y = 0.$$

$$P_y = -(d_2 + d_4) - d_2.$$

- **La 3^{ème} ligne:**

$$S_z = (S\theta_1 C\theta_2 + C\theta_1 S\theta_2)(C\theta_3 C\theta_4 - S\theta_3 S\theta_4) + (-S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)(S\theta_3 C\theta_4 + C\theta_3 S\theta_4).$$

$$N_z = (S\theta_1 C\theta_2 + C\theta_1 S\theta_2)(C\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)(-S\theta_3 S\theta_4 + C\theta_3 C\theta_4).$$

$$A_z = 0.$$

$$P_z = 0.$$

On applique le modèle géométrique direct en utilisant tous les paramètres cités au-dessus afin de créer et manipuler notre bras manipulateur sous Matlab.

2.2.1.2. Test du modèle géométrique direct de notre bras sous MATLAB

MATLAB est une plateforme de calcul et de programmation que des millions de chercheurs et de scientifiques utilisent pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles. La figure 2.2 représente l'interface de MATLAB.

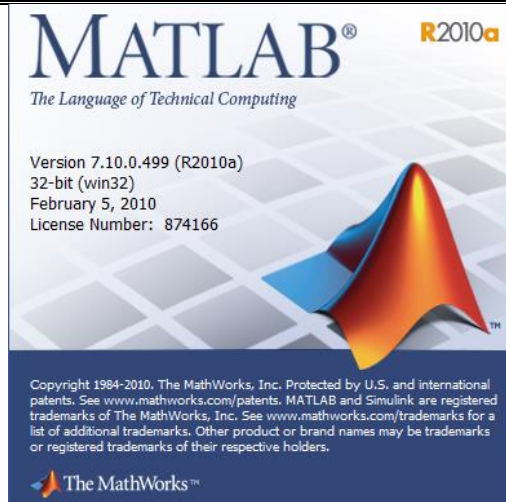


Figure 2.2. Interface MATLAB.

➤ Construction de notre bras sur MATLAB

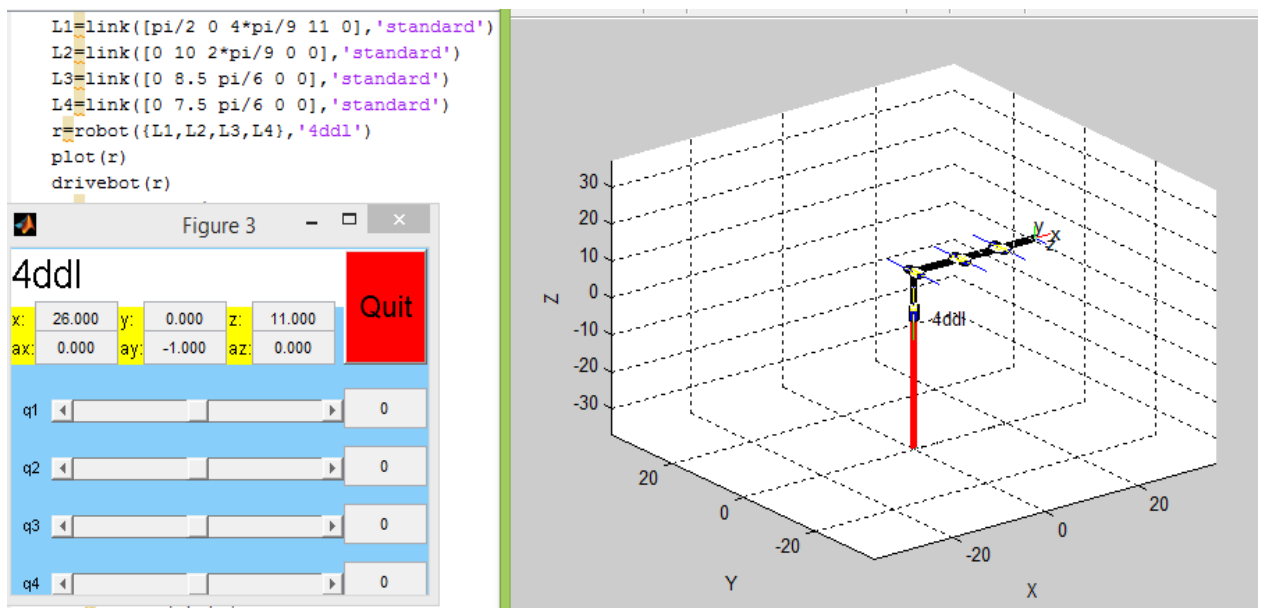


Figure 2.3. Construction de notre bras sur MATLAB.

Script

```
z1=trotz(4*pi/9)
```

```
x1=trotx(pi/2)
```

```
tx1=transl(0,0,0)
```

```
tz1=transl(0,0,11)
```

th1=z1*tz1*x1*tx1

z2=trotz(2*pi/9)

x2=trotx(0)

tx2=transl(10,0,0)

tz2=transl(0,0,0)

th2=z2*tz2*x2*tx2

z3=trotz(pi/6)

x3=trotx(0)

tx3=transl(8.5,0,0)

tz3=transl(0,0,0)

th3=z3*tz3*x3*tx3

z4=trotz(pi/6)

x4=trotx(0)

tx4=transl(7.5,0,0)

tz4=transl(0,0,0)

th4=z4*tz4*x4*tx4

th=th1*th2*th3*th4

q=[4*pi/9 2*pi/9 pi/6 pi/6]

t=fkine(r,q)

m=[1 1 1 1 0 0]

q=ikine(r,t,q,m)

➤ Le modèle géométrique direct sous MATLAB est :

```

th =
    -0.0302    -0.1710     0.9848     1.6089
    -0.1710    -0.9698    -0.1736     9.1245
     0.9848    -0.1736     0.0000    32.8013
         0         0         0         1.0000

```

Figure 2.4. Matrice de transformation homogène .

```

q =
    1.3963     0.6981     0.5236     0.5236

t =
    -0.0302    -0.1710     0.9848     1.6089
    -0.1710    -0.9698    -0.1736     9.1245
     0.9848    -0.1736     0.0000    32.8013
         0         0         0         1.0000

```

Figure 2.5. Le modèle géométrique direct .

2.2.2. Modèle géométrique inverse (MGI)

Le modèle géométrique inverse (MGI) est l'ensemble des relations inverses à celle du modèle géométrique direct. Ce modèle permet d'exprimer les variables articulaires q du bras manipulateur en fonction des coordonnées opérationnelles X exigées pour l'exécution d'une tâche donnée. [36]

$$Q = f^{-1}(X) \quad (2.9)$$

2.2.2.1. Calcul du modèle géométrique inverse de notre bras

Pour trouver le modèle géométrique du bras, on va implémenter la méthode dite de Paul.

La situation de l'organe terminal d'un robot manipulateur à n degrés de liberté est décrite par le modèle géométrique direct qui a pour expression :

$$T_1^n = T_1^0(q_1) T_2^1(q_2) \dots T_n^{n-1}(q_n) \tag{2.10}$$

Cette même situation désirée sera notée par la matrice de transformation homogène U_0 telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = T_1^0(q_1) T_2^1(q_2) \dots T_n^{n-1}(q_n) \tag{2.12}$$

Pour trouver les solutions de l'équation proposé Paul a proposé une méthode qui consiste à pré-multiplier successivement les deux membres de l'équation (2.12) par les matrices T_j^{j-1} pour j variant de 1 à n-1, opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche. Pour un robot à 4ddl à titre d'exemple, on procède comme suit :

on multiplie à gauche l'expression (2.12) par le terme T_0^1

$$U_0 T_0^1 = T_2^1 T_3^2 T_4^3 \tag{2.13}$$

La succession des équations permettent le calcul de tous les q_i est la suivante:

$$\begin{aligned} U_0 &= T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 \\ T_0^1 U_0 &= T_2^1 T_3^2 T_4^3 \\ T_1^2 T_0^1 U_0 &= T_3^2 T_4^3 \\ T_2^3 T_1^2 T_0^1 U_0 &= T_4^3 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Ces équations peuvent avoir des solutions évidentes, ou se ramènent aux principaux types rencontrés en robotique, mentionnés dans la figure 2.6 [34] ci-dessous :

Type1	$X r_i=Y$
Type2	$XS q_i+YCq_i=Z$
Type3	$X_1S q_i+Y_1Cq_i=Z_1$ $X_2S q_i+Y_2Cq_i=Z_2$
Type4	$X_1r_iSq_i=Y_1$ $X_2r_iCq_i=Y_2$
Type5	$X_1Sq_i=Y_1+Z_1r_j$ $X_2Cq_i=Y_2+Z_2r_j$
Type6	$WSq_j=XCq_i+YSq_i+ Z_1$ $WCq_j=XSq_i-YCq_i+ Z_2$
Type7	$W_1Cq_i+W_2Sq_i=XCq_i+YCq_i+Z_1$ $W_1Cq_i-W_2Sq_i=XCq_i-YCq_i+Z_2$
Type8	$XCq_i+YC(q_i + q_j)=Z_1$ $XSq_i+YS(q_i + q_j)=Z_2$

Figure 2.6. Type d'équation rencontré avec la méthode Paul.

La première itération revient à résoudre cette équation :

$$T_0^1 U_0 = T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (2.15)$$

Elle nous permet d'exprimer q_1 en fonction des termes de U_0 et des paramètres du robot.

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow T_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La matrice U_0 est de la forme suivante :

$$U_0 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Le deuxième terme de l'équation correspond à

$$T_p^0 = \begin{bmatrix} (C\theta_2.C\theta_3 - S\theta_2.S\theta_3).C\theta_4 - (-C\theta_2.S\theta_3 - S\theta_2.C\theta_3).S\theta_4 & -(C\theta_2.C\theta_3 - S\theta_2.S\theta_3).S\theta_4 - (-C\theta_2.S\theta_3 - S\theta_2.C\theta_3).C\theta_4 & 0 & 0 \\ (S\theta_2.C\theta_3 - C\theta_2.S\theta_3).C\theta_4 - (-S\theta_2.S\theta_3 + C\theta_2.C\theta_3).S\theta_4 & -(S\theta_2.C\theta_3 + C\theta_2.S\theta_3).S\theta_4 - (-S\theta_2.S\theta_3 + C\theta_2.C\theta_3).C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_2+d_3+d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nous pouvons donc réécrire cette équation :

$$T_p^0 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

En simplifiant le premier terme, on obtient l'équation suivante :

$$T_p^0 = \begin{bmatrix} S_x \cdot C\theta_1 & -S_x \cdot S\theta_1 & -N_x & S_x + A_x + P_x \\ S_y \cdot C\theta_1 & -S_y \cdot S\theta_1 & -N_y & S_y + A_y + P_y \\ S_z \cdot C\theta_1 & -S_z \cdot S\theta_1 & -N_z & S_z + A_z + P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Par identification, on peut extraire le système suivant :

$$\begin{cases} -S_x \cdot S\theta_1 = -(C\theta_2 \cdot C\theta_2 - S\theta_2 \cdot S\theta_3) \cdot S\theta_4 - (-C\theta_2 \cdot S\theta_3 - S\theta_2 \cdot C\theta_2) \cdot C\theta_4 \\ -S_y \cdot S\theta_1 = -(S\theta_2 C\theta_3 - C\theta_2 \cdot S\theta_3) \cdot S\theta_4 - (-S\theta_2 \cdot S\theta_3 + C\theta_2 \cdot C\theta_3) \cdot C\theta_4 \end{cases}$$

Donc : $-S_x \cdot S\theta_1 = -S_y \cdot S\theta_1$

On trouve au finale des résultats pour θ_1 :

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin(-S_x + S_y) \\ \theta'_1 = \theta_1 + 180 \end{cases}$$

Lors de la deuxième itération, on va résoudre cette équation :

$$T_1^2 T_0^1 U_0 = T_3^2 T_4^3 \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} C\theta_2 & S\theta_2 & 0 & 0 \\ -S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

On multiplier la matrice (2.20) fois la matrice (2.22) on trouve :

$$\begin{bmatrix} S_x \cdot (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) & -S_x \cdot (C\theta_1 \cdot S\theta_2 + S\theta_1 \cdot C\theta_2) & N_x & S_x + A_x + P_x \\ S_y \cdot (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) & -S_y \cdot (C\theta_1 \cdot S\theta_2 + S\theta_1 \cdot C\theta_2) & -N_y & S_y + A_y + P_y \\ S_z \cdot (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) & -S_z \cdot (C\theta_1 \cdot S\theta_2 + S\theta_1 \cdot C\theta_2) & -N_z & S_z + A_z + P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Le deuxième terme de l'équation (2.4) correspondant à :

$$\begin{bmatrix} (C\theta_3 \cdot C\theta_4 - S\theta_3 \cdot S\theta_4) & (C\theta_3 \cdot S\theta_4 - S\theta_3 \cdot C\theta_4) & 0 & 0 \\ (S\theta_3 \cdot C\theta_4 + C\theta_3 \cdot S\theta_4) & (-S\theta_3 \cdot S\theta_4 + C\theta_3 \cdot C\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 + d_4 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Par identification des matrices (2.23) et (2.24) on trouve :

$$\begin{cases} (C\theta_3 \cdot C\theta_4 - S\theta_3 \cdot S\theta_4) = S_x (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) \\ (S\theta_3 \cdot C\theta_4 + C\theta_3 \cdot S\theta_4) = S_y (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) \end{cases}$$

De (2.6) on trouve que :

$$\begin{aligned} S_x (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) &= -[S_y (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2)] \text{ donc} \\ S_x (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2) &+ [S_y (C\theta_1 \cdot C\theta_2 - S\theta_1 \cdot S\theta_2)] = 0 \end{aligned}$$

en résolvant cette équation, on trouve deux solutions pour θ_2 :

$$\begin{cases} \theta_2 = \text{Atan2}((S_x C\theta_1 + S_y C\theta_1); (-S_y S\theta_1 + S_x S\theta_1)) \\ \theta'_2 = \theta_2 + 180 \end{cases}$$

Pour la troisième itération, on va résoudre cette équation :

$$T_2^3 T_1^2 T_0^1 U_0 = T_4^3 \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} C\theta_3 & S\theta_3 & 0 & 0 \\ -S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

En multipliant la matrice (2.23) avec la matrice (2.26) on trouve le premier terme de l'équation (2.25). On suppose que :

$$T_0^1 T_1^2 = \begin{bmatrix} A & B & C & G \\ D & E & F & H \\ S_z & N_z & A_z & I_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

En multipliant (2.27) et (2.26) on trouve :

$$\begin{bmatrix} AC\theta_3 - BS\theta_3 & AS\theta_3 + BC\theta_3 & C & -d_3C + G \\ DC\theta_3 - FS\theta_3 & DS\theta_3 + FC\theta_3 & F & -d_3F + H \\ S_z C\theta_3 - N_z S\theta_3 & S_z C\theta_3 + N_z S\theta_3 & A_z & -d_3A_z + I_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Par identification de la matrice (2.28) avec la matrice :

$$\begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & 0 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

On trouve

$$\begin{cases} C\theta_4 = AC\theta_3 - BS\theta_3 \\ S\theta_4 = DS\theta_3 + FC\theta_3 \end{cases}$$

En résolvant cette équation, on trouve deux solutions pour θ_3 :

$$\begin{cases} \theta_3 = \text{Atan2}(-F + A; -B - D) \\ \theta'_3 = \theta_3 + 180 \end{cases}$$

On peut calculer θ_4 à partir du système suivant :

$$\begin{cases} -C\theta_4 = AC\theta_3 - BS\theta_3 \\ S\theta_4 = DS\theta_3 + FC\theta_3 \end{cases}$$

On trouve deux solutions :

$$\begin{cases} \theta_4 = \text{Atan2}(AC\theta_3 - BS\theta_3; DS\theta_3 + FC\theta_3) \\ \theta'_4 = \theta_4 + 180 \end{cases}$$

2.2.2.2. Test du modèle géométrique inverse de notre bras sous MATLAB

```

m =
    1    1    1    1    0    0

q =
    1.3963    0.6981    0.5236    0.5236

```

Figure 2.7. Le modèle géométrique inverse.

2.3. Modélisation cinématique

2.3.1. Modèle cinématique direct (MCD)

Le modèle cinématique directe d'un robot manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles (\dot{X}), en fonction des vitesses articulaires (\dot{q}). Il est noté : [36]

$$\dot{X} = J \dot{q} \quad (2.30)$$

Où : J désigne la matrice jacobéenne de dimension (m x n)

Le calcul de la matrice Jacobienne peut se faire en dérivant le MGD, $X = f(q)$, à partir de la relation suivante :

$$J(q) = \left(\frac{\partial f}{\partial q^T} \right) = \left[\frac{\partial f}{\partial q_1} \dots \dots \frac{\partial f}{\partial q_n} \right] = [J_1 \dots \dots J_n] \quad (2.31)$$

$$\begin{cases} X = d_1 \cdot C\theta_1 + d_2 \cdot C(\theta_1 + \theta_2) + d_3 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ Y = d_1 \cdot S\theta_1 + d_2 \cdot s(\theta_1 + \theta_2) + d_3 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + d_4 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \varphi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{cases} \quad (2.32)$$

La matrice jacobienne est calculée en dérivant ces trois relations par rapport à θ_1 , θ_2 , θ_3 et θ_4 :

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} = -S \cdot d_1(\theta_1) - d_2 \cdot S(\theta_1 + \theta_2) - d_3 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - d_4 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_2} = -d_2 \cdot S(\theta_1 + \theta_2) - d_3 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - d_4 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_3} = -d_3 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - d_4 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial x}{\partial \theta_4} = -d_4 \cdot S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{array} \right.$$

(2.34)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial y}{\partial \theta_1} = d_1 \cdot C(\theta_1) + d_2 \cdot C(\theta_1 + \theta_2) + d_3 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + d_4 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_2} = d_2 \cdot C(\theta_1 + \theta_2) + d_3 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + d_4 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_3} = d_3 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + d_4 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_4} = d_4 \cdot C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{array} \right. \quad (2.35)$$

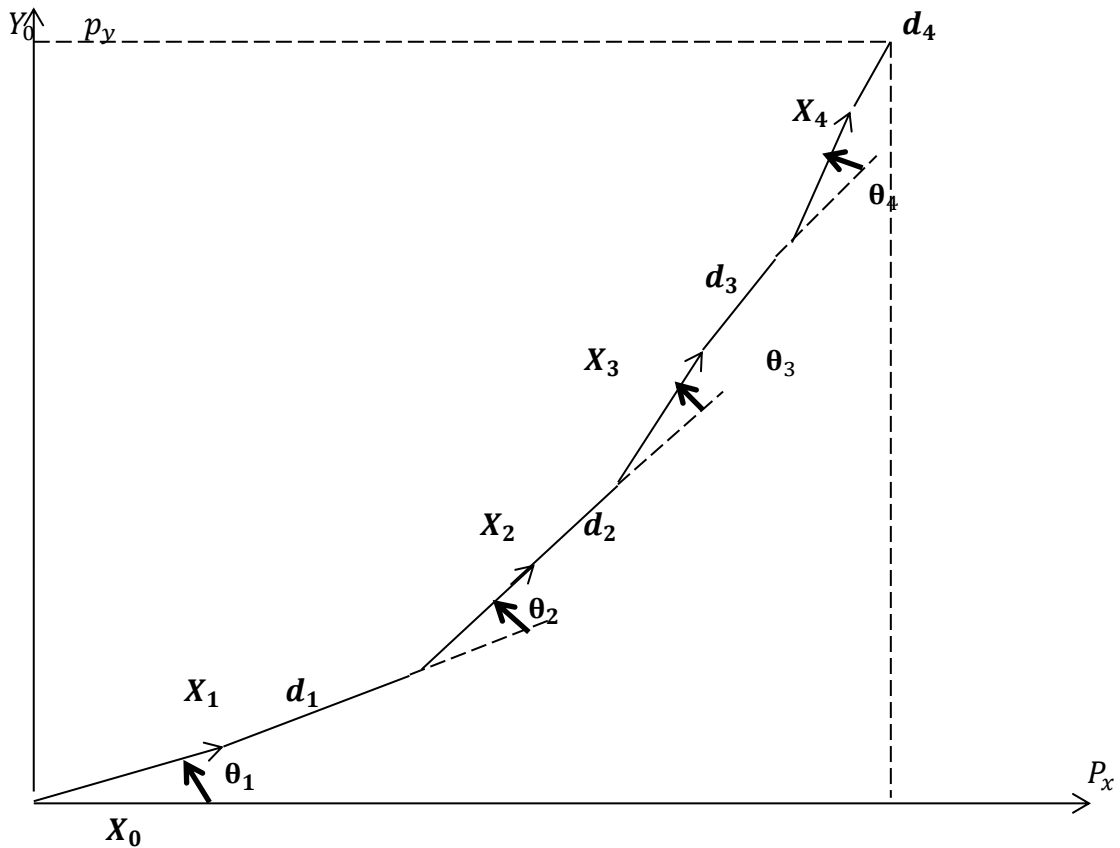


Figure 2.8. Robot plan de notre bras manipulateur.

2.3.2. Modèle cinématique inverse (MCI)

L'objectif du modèle cinématique inverse d'un robot manipulateur, sont de calculer les vitesses des coordonnées articulaires (\dot{q}), en fonction des vitesses opérationnelles (\dot{X}). [36]

Il est noté : $\dot{q}=J^{-1} \dot{X}$ (2.36)

Avec :

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-d_1}{S(\theta_1)} & \frac{-d_2}{S(\theta_1+\theta_2)} & \frac{-d_3}{S(\theta_1+\theta_2+\theta_3)} & \frac{-d_4}{S(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4)} \\ \frac{d_1}{C(\theta_1)} & \frac{d_2}{C(\theta_1+\theta_2)} & \frac{d_3}{C(\theta_1+\theta_2+\theta_3)} & \frac{d_4}{C(\theta_1\theta_2\theta_3\theta_4)} \end{bmatrix}$$
 (2.37)

2.4. Modélisation du moteur à courant continu

Dans les systèmes de commandes, les moteurs à courant conti sont très importants donc en va analyser leurs modèles, la figure 2.9 représente le shéma du moteur à courant continu [37].

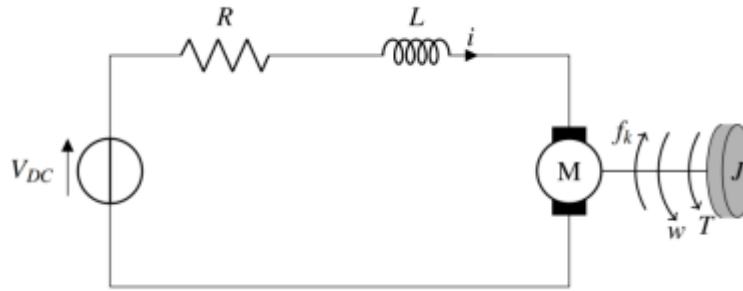


Figure 2.9. Schéma du moteur à courant continu.

2.4.1. Les équations électromécaniques

Equation électrique

$$VL + VR + VEmf = va(t)$$
 (2.38)

$$L_a di_a(t)/ dt + R_a i_a(t) + vb = va(t)$$
 (2.39)

Où vb est la constante force électromécanique (Vs/rad)

$$vb(t)=Ka \Phi w_m(t)$$
 (2.40)

- w_m : vitesse de l'arbre du moteur.

Equation mécanique

$$T_m(t)=J_m \frac{dw_m}{dt} + c_r(t)+B_m w_m(t)$$
 (2.41)

L'équation (2.41) indique la relation entre le couple actuel et développé.

$$T_m = k_t \Phi i_a(t) \quad (2.42)$$

Avec :

- $T_m(t)$: le couple de moteur produit par l'arbre du moteur
- Φ : le flux magnétique ;
- i_a : le courant de l'armature ;
- K_t : constant proportionnelle.

2.4.2. Modèle d'état du moteur

On a le couple résistant $c_r(t) = 0$ et la vitesse angulaire de l'arbre du moteur est une sortie.

On remplace l'équation (2.42) dans (2.41) et l'équation (2.40) dans (2.39), on obtient :

$$\frac{dw_m(t)}{dt} = -\frac{B_m}{J_m} w_m(t) + \frac{k_t}{J_m} i_a(t) \quad (2.43)$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{k_a}{L_a} w_m(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) + \frac{1}{L_a} v_a(t) \quad (2.44)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = w_m(t) \quad (2.45)$$

Le modèle d'état est donné par :

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.46)$$

$$Y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.47)$$

On propose que :

$$\begin{cases} x1(t) = i_a(t) \\ x2(t) = \theta(t) \\ x3(t) = w_m(t) \end{cases} \quad (2.48)$$

La dérivée :

$$\begin{cases} \dot{x}1(t) = \frac{di_a(t)}{dt} \\ \dot{x}2(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \\ \dot{x}3(t) = \frac{dw_m(t)}{dt} \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & -\frac{K_a}{L_a} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_a(t) \quad (2.50)$$

L'équation de sortie est :

$$Y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

La fonction de transfert de la vitesse du moteur est donnée par :

$$G_{vitesse}(s) = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{kt}{J_m L_a s^2 + (L_a B_m + R_a J_m) s + k_t k_b} \quad (2.52)$$

Avec :

- J_m : le moment d'inertie.
- B_m : le coefficient de frottement du moteur.

Pour obtenir la fonction de transfert de la position, on multiplie la fonction de transfert de la vitesse par le terme $\frac{1}{s}$.

La figure (2.10) représente le schéma fonctionnel du moteur à courant continu [38].

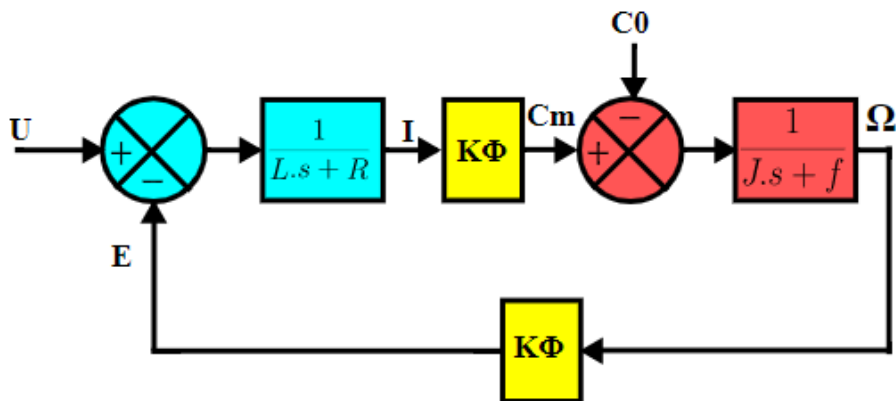


Figure 2.10. Schéma fonctionnel du moteur à courant continu.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la modélisation géométrique des robots manipulateurs, en soulignant son importance dans le domaine de la robotique. Nous avons également créé notre bras manipulateur sous MATLAB, effectué les calculs du MGD et du MGI à l'aide de la méthode de Denavit-Hartenberg et enfin, nous avons fait la modélisation du moteur à courant continu.

La conception et la réalisation de notre bras manipulateur seront détaillées dans le chapitre suivant, où nous présenterons toutes les composantes utilisées pour mener à bien ce projet.

Chapitre III

Matériels et Réalisation

3.1. Introduction

Après avoir exploré les généralités sur la robotique, en particulier sur les bras manipulateurs, ainsi que la modélisation mathématique, nous abordons dans ce chapitre le cœur de notre projet : la conception et la réalisation de notre bras manipulateur à quatre degrés de liberté (DDL). Nous y présentons les composantes utilisées, les logiciels Arduino et Isis Proteus, un grafctet du système, ainsi que la commande de type PID implémentée.

3.2. Matériel utilisé

3.2.1. La carte Arduino

Arduino est un progiciel matériel et logiciel open-source, simple d'utilisation. Il comprend deux éléments principaux : le matériel (hardware) et le logiciel (software). Arduino permet aux utilisateurs de concevoir des systèmes électroniques programmables sans avoir une connaissance approfondie de l'électronique. La plateforme est constituée d'une carte électronique et d'un logiciel de programmation pour configurer la carte afin d'exécuter des opérations spécifiques.

Arduino contient également des connecteurs pour connecter des LED, des moteurs, des relais, des affichages, des écrans,...etc.

Les cartes Arduino sont les cerveaux qui rendent les systèmes électroniques intelligents et donnent vie aux appareils mécaniques [39].

Il existe des plusieurs cartes électroniques programmables, mais la plus utilisée est la carte Arduino Uno et cela est dû aux caractéristiques et fonctionnalités qu'elle contient, on cite :

- ❖ **Le prix** : son prix est beaucoup moins cher par rapport à certaines autres cartes.
- ❖ **Multi plateforme** : le programme Arduino peut fonctionner sous plusieurs systèmes d'exploitation contrairement à la plupart des programmes qui se limitent au système d'exploitation 'windows'.
- ❖ **Un environnement de programmation clair et simple** : le langage de programme est simple, surtout pour les débutants dans ce domaine.
- ❖ **Logiciel Open Source** : Le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous une licence open source et peuvent être complétés par des programmeurs expérimentés.

Le langage de programmation Arduino s'agit d'une application JAVA multi plateformes.

- ❖ **Matériel Open source** : les cartes Arduino sont basées sur les Microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, il est publié sous licence creative commons ce qui signifie que ceux qui ont de l'expérience peuvent créer leur propre nouvelle version des cartes Arduino et les vendre sans frais [40].



Figure 3.1. Arduino Uno.

Tableau 3. 1. Synthèse des caractéristiques de l'arduino uno[41].

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5v
Tension d'alimentation(recommander)	7-12v
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)	40mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	500mA max
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328)
Tension d'alimentation (limites)	6-20v
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2KB
Mémoire EEPROM (mémoire non	1KB

volatile)	
Vitesse d'horloge	16MHZ

3.2.1.2. Les composants principaux d'une carte Arduino

Une carte Arduino contient plusieurs composants :

- **Alimentation (USB / BARREL JACK) :** c'est un appareil qui connecte la carte à la source d'alimentation. L'Arduino UNO peut être alimenté via un câble USB depuis un ordinateur ou via une alimentation avec une prise jack. Le port USB (1) et l'emplacement (2) sont illustrés dans la figure 3.2
- **Pins (5V, 3.3V, GND, Analogique, Numérique, PWM, AREF):** varient de l'une à l'autre selon ses fonctions. Nous les utilisons pour connecter des fils.
- **GND (3):** il en contient beaucoup et leur fonction est de mettre le circuit à la terre.
- **5V (4) & 3.3V (5):** la broche 5V fournit du 5V et la broche 3V fournit du 3V.
- **Analogique (6):** ces broches peuvent lire le signal d'un capteur analogique (par exemple un capteur de température) et le convertir en une valeur numérique que nous pouvons lire.
- **Numérique (7) :** utilisé pour les entrées numériques (par exemple pour indiquer qu'un bouton a été enfoncé) et pour les sorties numérique (par exemple pour alimenter une LED).
- **PWM (8) :** nous considérons ces broches comme des moyens de simuler une sortie analogique (par exemple un fondu de LED).
- **AREF (9) :** représente une référence analogique. Dans la plupart des cas, nous pouvons laisser ces mâchoires seules. Utilisé pour définir une tension de référence externe (0 à 5 volts) comme limite supérieure pour les broches d'entrée analogiques.
- **Bouton Reset :** Arduino a un bouton de réinitialisation (10). Lorsqu'il est enfoncé, la broche de réinitialisation est temporairement connectée à GND et le code chargé dans l'Arduino est redémarré.
- **Indicateur d'alimentation LED (11) :** cette LED devrait s'allumer à chaque fois que nous connectons l'Arduino à une source d'alimentation, et si elle ne s'allume pas, cela signifie qu'il y a un problème avec le circuit électrique.
- **LED TX/RX (12) :** ce sont des LED que l'on trouve sur la plupart des appareils électroniques, et leur mission est de donner un signal à chaque fois qu'il y a une

réception ou une transmission de données par l'Arduino (TX pour la transmission et RX pour la réception).

- **Circuit intégré principal (13):** c'est le cerveau de l'Arduino et il diffère d'une carte à une autre mais généralement appartient à la série ATmega IC d'ATMEL.
- **Régulateur de tension (14) :** il régule la tension [42].

La figure 3.2 [43] représente tous les composants que nous venons de citer.

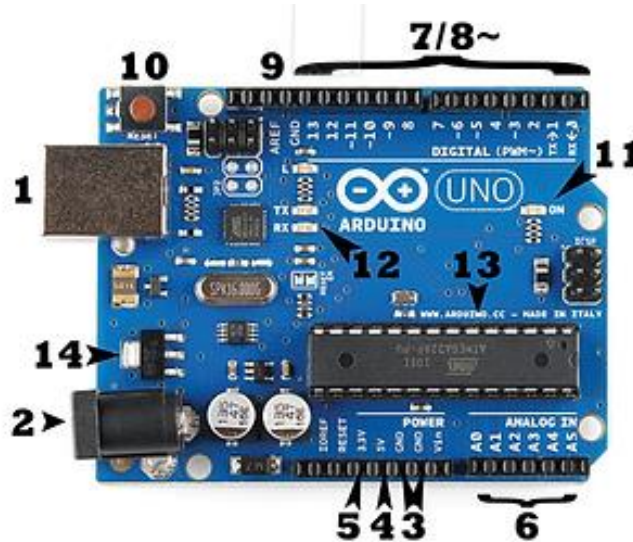


Figure 3.2. Arduino UNO.

3.2.2. Les servomoteurs (actionneurs)

Les servomoteurs sont des moteurs qui sont facilement pilotables à l'aide de l'Arduino. Ils sont capables de maintenir une position statique lorsqu'ils sont utilisés en modélisme. Ce sont des moteurs à courant continu, pilotés par un driver qui régule la position, c'est ce qu'on appelle un système asservi.

Les servomoteurs disposent d'un axe de rotation qui est entravé par un système de bridage. Cela ne veut pas dire qu'il ne tourne pas mais qu'il a un certain angle de rotation, par exemple le 'sg90', montré dans le figure 3.3. [44], peut tourner de 0 jusqu'à 180 degrés seulement, autrement dit, il ne peut pas faire un cycle complet.

Le servomoteur possède trois fils de connexion :

- Câble rouge : pour l'alimentation +5v.
- Câble marron : GND la terre.
- Câble jaune : l'entrée de commande PWM.

3.2.2.1. Les composants principaux d'un servomoteur

- ❖ **MCC** : connecté à une petite carte de circuit imprimé à l'intérieure de l'unité celle-ci contrôle la rotation de moteur ainsi que le sens de rotation.
- ❖ **Réducteurs (engrenages)** : permettent de convertir la vitesse de sortie à une vitesse latente et le couple élevé.
- ❖ **Le potentiomètre** : connecté à une carte électronique, il s'agit d'une résistance variable lorsque le pignon finale tourne, il fait tourner le potentiomètre qui modifier la résistance et la carte électronique lit cette valeur pour connaître la position de la sortie.
- ❖ **Un axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation** : nous pouvons connecter divers accessoires pour utiliser la rotation.
- ❖ **Un dispositif électronique d'asservissement.**

La figure 3.3 représente un servomoteur sg90 [44].



Figure 3.3. Servomoteur sg90.

- L'énergie consommée par les servomoteurs est fournie par l'alimentation, mais les signaux de commande consomment très peu d'énergie.
- Le microcontrôleur est celui qui contrôle les mouvements des servomoteurs.
- Un servomoteur est contrôlé à l'aide d'un signal PWM à fréquence fixe de 50 Hz ($T=20$ ms).
- Un servomoteur ne tourne pas instantanément. Ce sont plutôt des signaux envoyés (signaux de commande) qui indiquent exactement l'angle de rotation [44].
- **Exemple** : signal de commande pour un servomoteur pouvant varier de 0 à 180° illustré dans la figure 3.4.

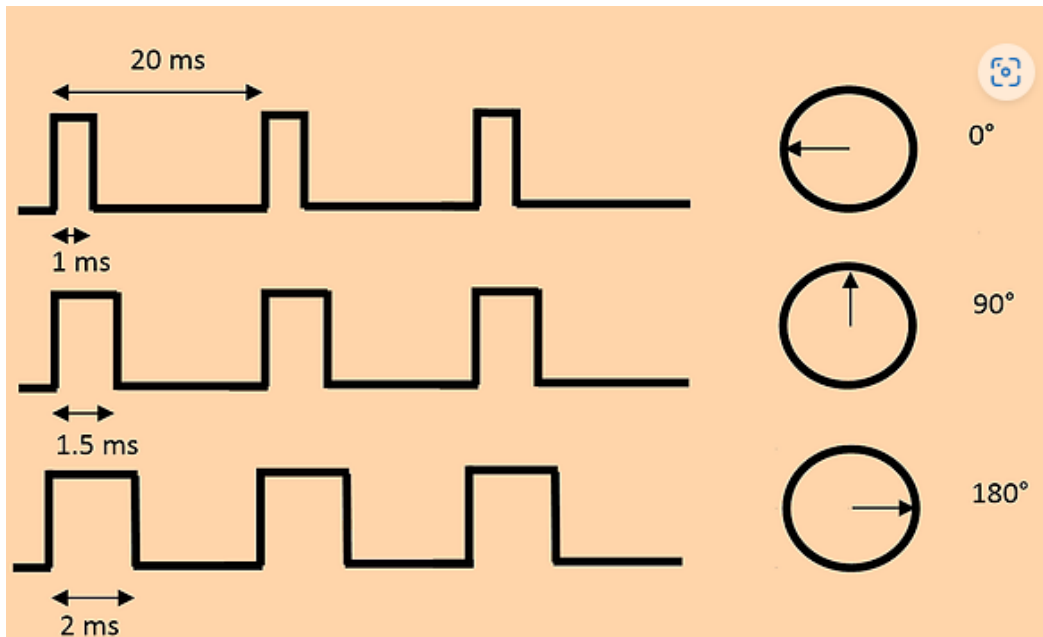


Figure 3.4. Signal de commande pour un servomoteur.

3.2.2.2. Les connaissances nécessaires au pilotage d'un servomoteur

- **#include <Servo.h>** : L'utilisation de la librairie servo.h qui prend en charge la communication de bas niveau entre l'Arduino et le servomoteur. Les commandes précédées par # sont des ordres particuliers donnés au compilateur.
- **Servo myservo**; La création d'un objet de type Servo, appelé ici myservo.
- **My servo.attach(9)** : Le fil de commande de ce servo sera connecté au PIN 9 et l'objet myservo pilotera ce PIN.
- **My servo.write(90); myservo.write(Angle)**: Demander au servomoteur de se déplacer à l'angle désiré, soit de façon absolue en lui indiquant une valeur entière (90°) dans le premier cas, soit en lui passant le contenu d'une variable (Angle) compris entre 0 et 180, ce qui peut être utile par exemple pour donner une progressivité au déplacement en faisant varier l'angle d'un pas fixe (quelques degrés) par une boucle.
- **My servo.read(Angle)** : Pour lire la valeur de l'angle du servomoteur [45].

3.2.3. Les fils de connexion

La figure 3.5 représente les fils de connexion Arduino avec les autres composants.

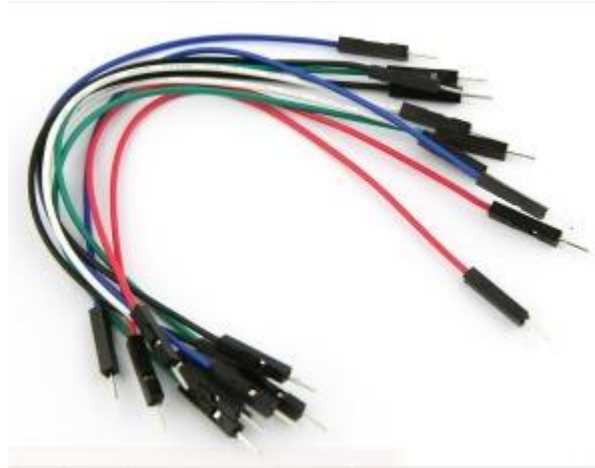


Figure 3.5. Les fils de connexion.

3.2.4. Régulateur de tension

LM2596 DC-DC Module Abaisseur Regulateur Tension Step Down, peut supporter 3A mais pour une utilisation de longue durée, un ampérage de 2-2.5A est recommandé, pour une tension entrante allant de 3.2V à 40V et une tension sortante de 1.25V à 35V.

- Tension d'entrée: 4.5 – 40V.
- Tension de sortie: 1,5 – 35V (réglable).
- Courant de sortie: Rated 2A actuelle, 3A maximum (dissipateur de chaleur supplémentaire est nécessaire).
- Efficacité de conversion: Jusqu'à 92%.
- Sens de réglage du potentiomètre: Sens horaire (augmentation), sens anti-horaire (diminution).
- Fréquence de commutation: 150 KHz.
- Redresseur: non synchrone de rectification.
- Propriétés du module: Non isolé module abaisseur.
- Protection de court-circuit: limitation de courant, car la reprise.
- Température de fonctionnement: -40 à 85 degrés Celsius (puissance de sortie 10 W ou moins).
- Augmentation pleine charge Température: 40 degrés Celsius.
- Régulation de la charge: $\pm 0,5\%$.
- Régulation de tension: $\pm 0,5\%$.

La figure 3.6 représente un régulateur de tension LM2596 [46].



Figure 3.6. Régulateur de tension LM2596.

3.2.5. Câble d'alimentation

La figure 3.7 représente un câble d'alimentation 8v.



Figure 3.7. Câble d'alimentation.

3.2.6. Plaque d'essai

La plaque d'essai, également connue sous le nom de breadboard ou protoboard, est un outil essentiel pour les passionnés d'électronique. Elle permet d'assembler et de tester des circuits électroniques sans soudure, facilitant ainsi les modifications et les ajustements.

Une plaque d'essai est un tableau composé d'orifices électriquement connectés entre eux de façon interne. Elle est fabriquée en deux matériaux, un isolant et un conducteur connectant électriquement les orifices entre eux et suivant un modèle horizontal ou vertical. Elle permet d'insérer les éléments électroniques et les fils pour le montage et prototypage de circuits électronique [47].

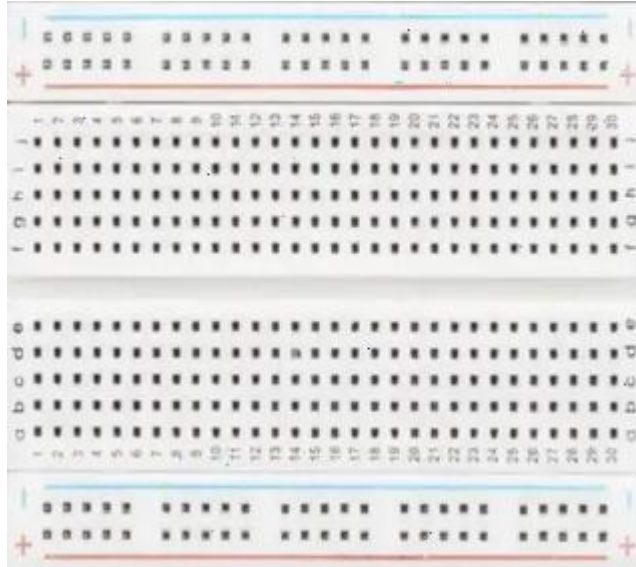


Figure 3.8. Plaque d'essai électronique.

3.2.7. Capteur infrarouge

Un capteur infrarouge (IR) est un appareil électronique capable de détecter et de mesurer l'énergie dans la plage infrarouge. Cette technologie est largement utilisée dans tous les domaines, de la sécurité intérieure à l'aviation et à l'espace en passant par la médecine et l'industrie. Le principe de base du capteur IR est sa capacité à détecter la chaleur des objets, ce qui lui permet de fonctionner même dans l'obscurité totale, la figure 2.9 représente un capteur infrarouge.



Figure 3.9. Capteur infrarouge.

A. Principe de fonctionnement

Les capteurs infrarouges fonctionnent en détectant le rayonnement infrarouge, une forme de lumière invisible située au-delà de l'extrémité rouge du spectre visible. Ils se composent généralement d'un matériau sensible aux IR, qui absorbe le rayonnement et produit un

signal électrique en réponse. Ce signal peut ensuite être amplifié et traité pour obtenir des informations utiles.

B. Les types des capteurs infrarouges

Il existe deux principaux types de capteurs IR : les capteurs passifs et les capteurs actifs. Alors que les détecteurs passifs réfléchissent uniquement le rayonnement émis par les objets situés dans leur portée, les détecteurs passifs réfléchissent le rayonnement lui-même et mesurent le rayonnement des objets environnants.

C. Les domaines d'application des capteurs infrarouge

- ❖ **Sécurité et surveillance** : les capteurs infrarouges sont utilisés dans les systèmes de sécurité pour détecter les mouvements des personnes dans l'environnement.
- ❖ **Téledétection** : En astronomie et météorologie, les détecteurs IR sont utilisés pour mesurer la température des étoiles ou pour observer la structure des nuages et de l'atmosphère.
- ❖ **Médecine** : Dans le domaine médical, les capteurs IR permettent de réaliser des tests non invasifs comme la thermographie pour détecter des anomalies de température corporelle.
- ❖ **Industrie** : Également utilisé pour contrôler les processus industriels tels que la surveillance de la température dans les processus de fabrication.

D. Avantages et limites des capteurs infrarouges

Les capteurs IR offrent de nombreux avantages, comme pouvoir travailler dans l'obscurité et détecter la chaleur. Cependant, ils peuvent être contaminés par divers facteurs environnementaux tels que la fumée, la poussière et l'humidité, qui peuvent réduire leurs performances dans certaines conditions.

En résumé, les capteurs infrarouges représentent une technologie importante dans de nombreuses industries en raison de leur capacité à détecter et mesurer avec précision les rayonnements. Son utilisation continue d'évoluer grâce au développement de technologies qui offrent de nouvelles formes d'application. [48]

3.3. Les logiciels

3.3.1. Logiciel ISIS (Intelligent Schematic Input System)

3.3.1.1. Présentation de logiciel

Le logiciel Isis Proteus est spécialement utilisé pour créer des schémas électriques. De plus, il possède une propriété très importante qui nous permet de détecter et d'identifier les erreurs qui existent dans les schémas électriques très tôt, c'est-à-dire dès la phase de conception, et cela est dû à sa capacité de simulation, Ce logiciel nous permet de contrôler de nombreuses représentations graphiques de nos circuits, ce qui nous permet indirectement d'utiliser des circuits électriques conçus avec ce logiciel dans notre documentation. [49]

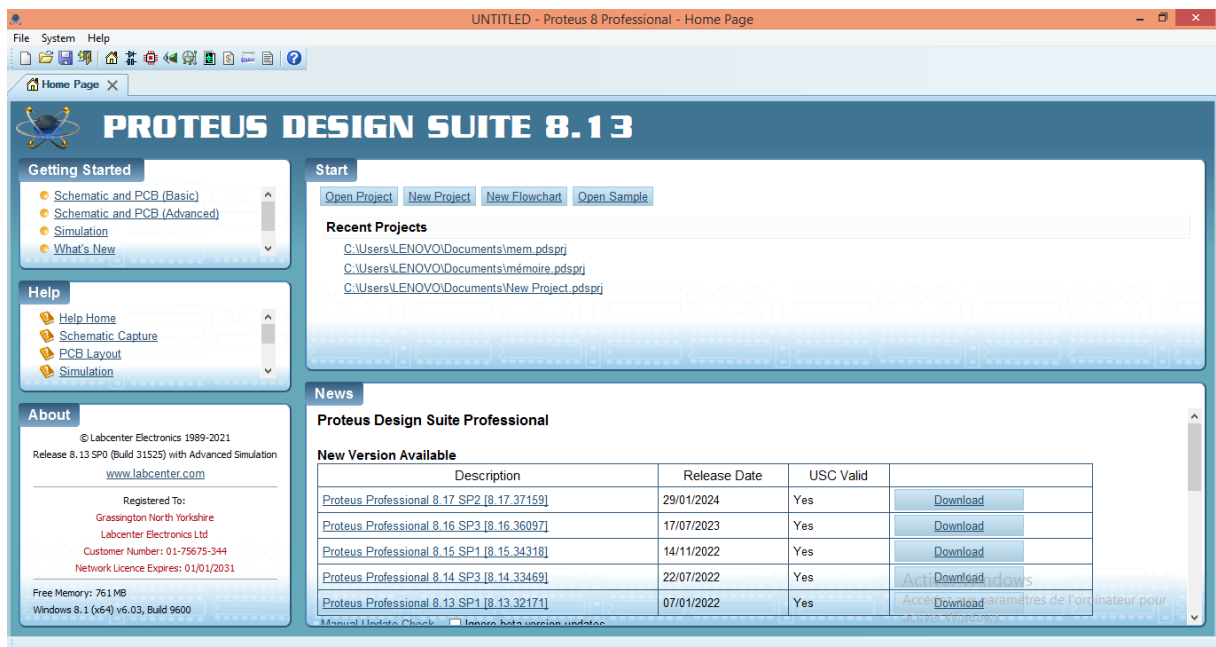


Figure 3.10. Interface de Proteus.

3.3.1.2. Les étapes suivies pour créer des schémas électriques

Pour créer n'importe quel schéma électrique dans Isis Proteus, il faut suivre les étapes suivantes :

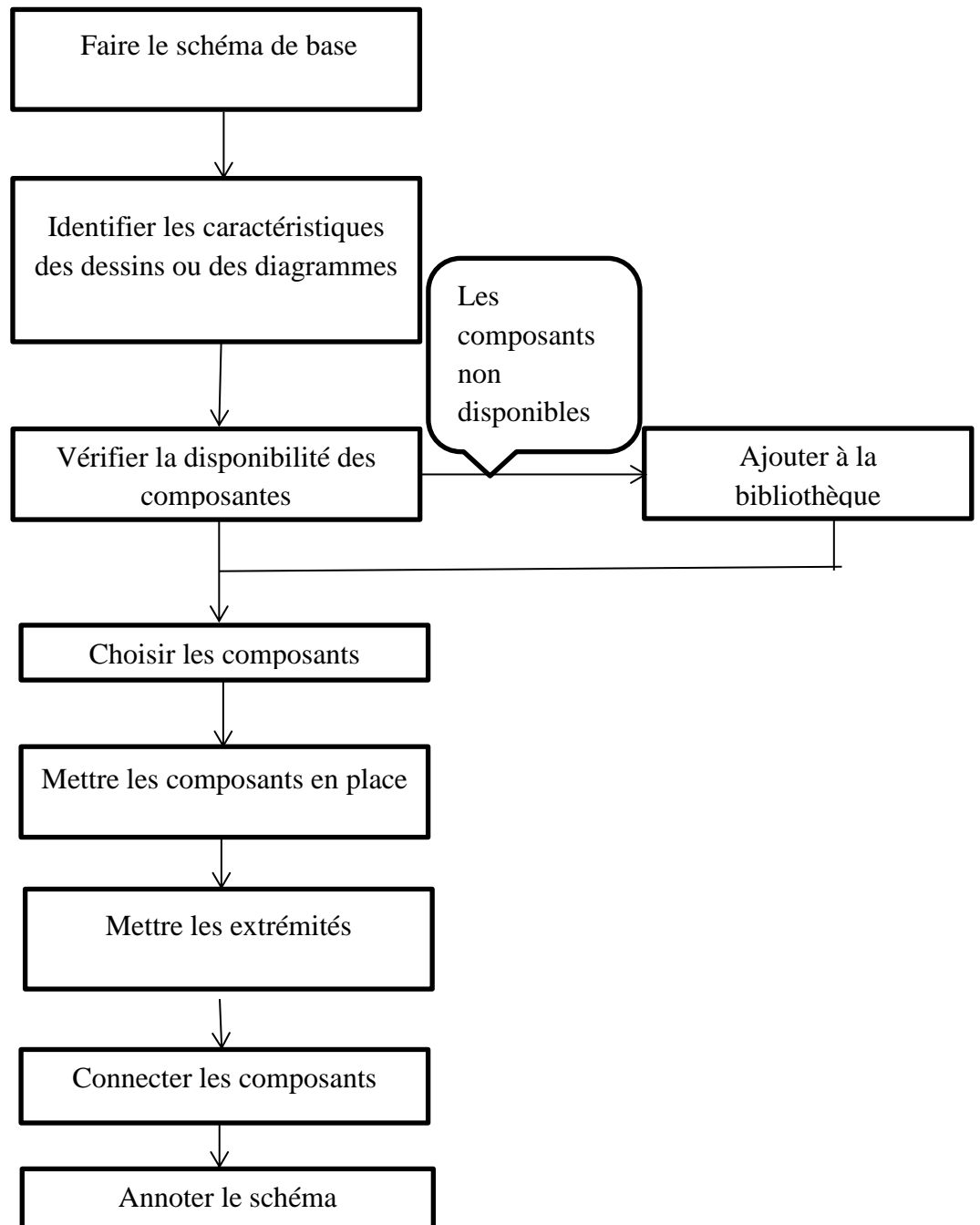


Figure 3.11. Les étapes à suivre pour tracer un schéma électrique.

3.3.1.3. La simulation de notre bras manipulateur sur ISIS Proteus

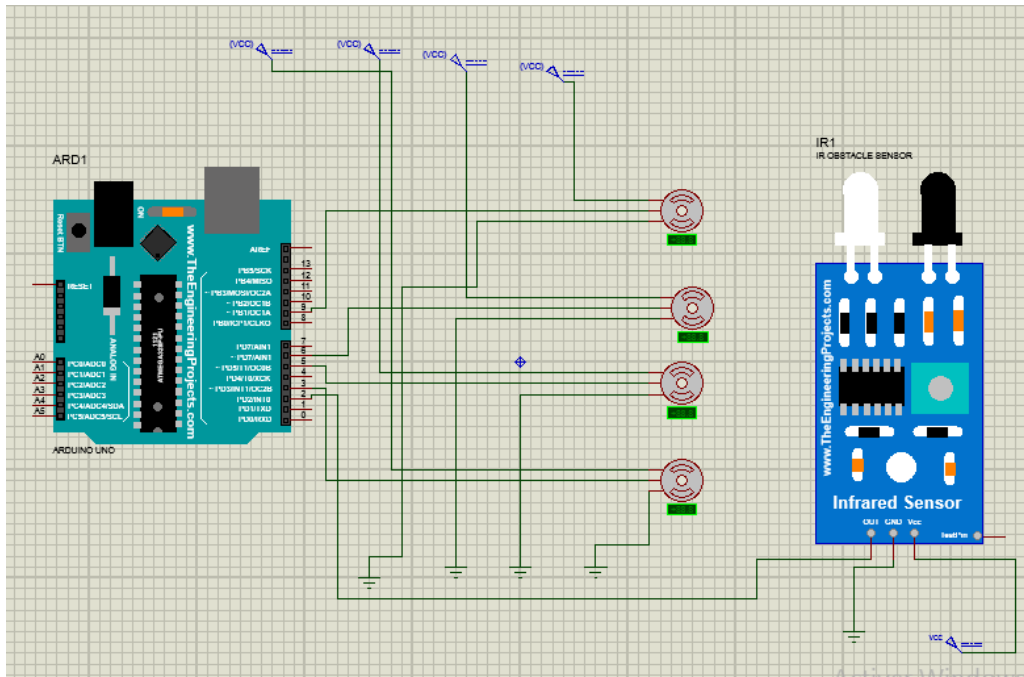


Figure 3.12. Simulation de la commande du notre bras manipulateur.

3.3.2. Logiciel de programmation Arduino

Le logiciel Arduino est un environnement de développement intégré (IDE) gratuit et open source qui peut être téléchargé sur le site officiel d'Arduino.

L'IDE Arduino nous aide :

- Pour l'édition du programme : Le programme est constitué de croquis (sketches en anglais), programmes sont écrits en C.
- Pour compiler ce programme en « langage machine » de l'Arduino : la compilation est une traduction du langage C vers le langage du microcontrôleur.
- Pour communiquer avec la carte Arduino via un terminal (ou un moniteur série): Lorsque le programme s'exécute dans la mémoire Arduino, il peut communiquer avec l'ordinateur tant que la connexion est active (câble USB etc.) [50].

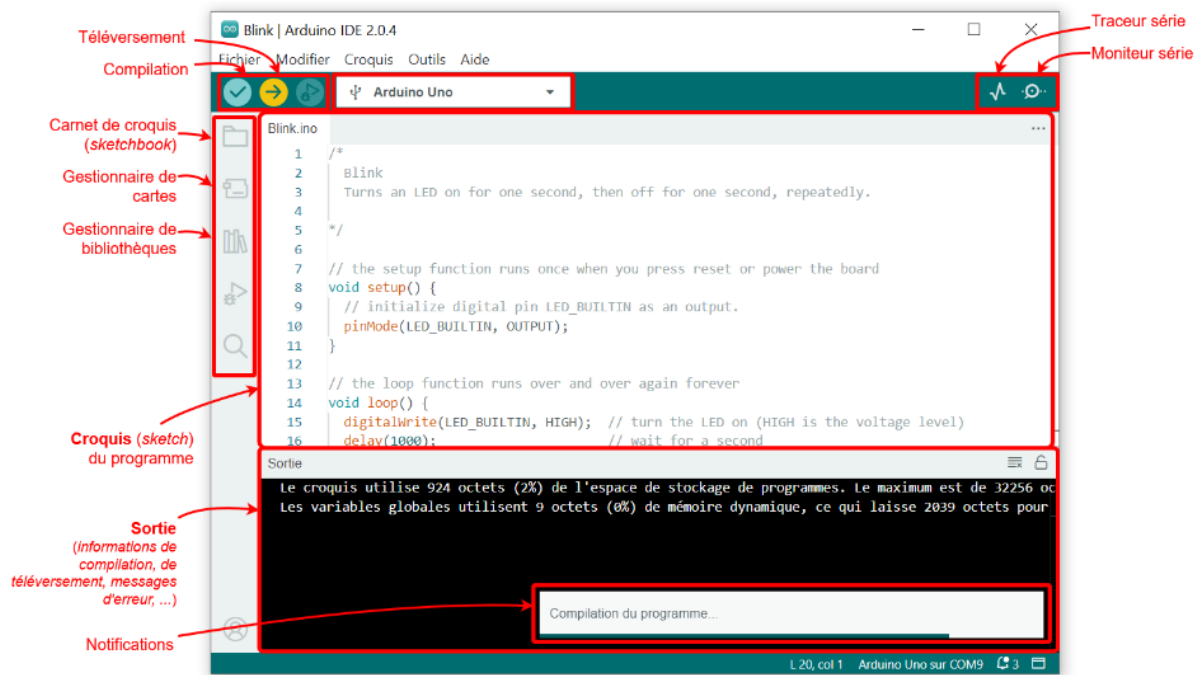


Figure 3.13. L'interface de logiciel Arduino.

3.4.1. Les étapes suivies pour créer notre code Arduino

- Charger la bibliothèque des servomoteurs dans le logiciel Arduino.
- Déclarer tous les servomoteurs utiliser (4 servomoteurs).
- Déclarer le capteur infrarouge.
- Déterminer la position initiale de chaque servomoteur.
- Attacher chaque servomoteur à sa propre broche sur la carte Arduino.
- Utiliser la boucle **For** pour commander tous les mouvements possibles pour chacun des servomoteurs (en respectant les conditions du capteur).

3.5. La réalisation de bras

3.5.1. Etude socio-économique

Le tableau 3.1 résume le prix de revient des composants utilisés dans ce projet.

Tableau 3. 2. Etude socio-économique.

Article	Prix unitaire(DA)	quantité	prix(DA)
Carte Arduino	2500	1	2500
servomoteur	800	4	3200
Fils de connexion	10	20	200
Régulateur de tension	500	1	500
Câble d'alimentation	700	1	700
Capteur infrarouge	500	1	500

Depuis ce tableau, le prix de revient est de **7600DA**. Ce montant n'inclut pas le prix des pièces mécanique.

3.5.2. Organigramme

Chaque servomoteur est contrôlé individuellement pour permettre des mouvements précis du bras manipulateur dans les quatre degrés de liberté.

L'organigramme ci-dessous est une représentation séquentielle du fonctionnement du bras manipulateur.

1. Base du bras manipulateur :

Servomoteur 1 : Contrôle la rotation de la base.

2. Premier degré de liberté (DDL) - Rotation de la base :

Servomoteur 1 : Assure la rotation horizontale de la base du bras.

3. Deuxième degré de liberté (DDL) - Élévation verticale :

Servomoteur R2 : Contrôle l'élévation verticale du bras par rapport à la base.

4. Troisième degré de liberté (DDL) - Pivotement horizontal :

Servomoteur R3 : Permet le pivotement horizontal du bras par rapport à son axe vertical.

5. Quatrième degré de liberté (DDL) - Rotation de l'outil :

Servomoteur R4 : Contrôle la rotation de l'outil ou de l'extrémité du bras.

6. Préhenseur ou outil :

Attaché à l'extrémité du bras manipulateur, contrôlé par le servomoteur R4.

3.5.3. Le grafcet de système

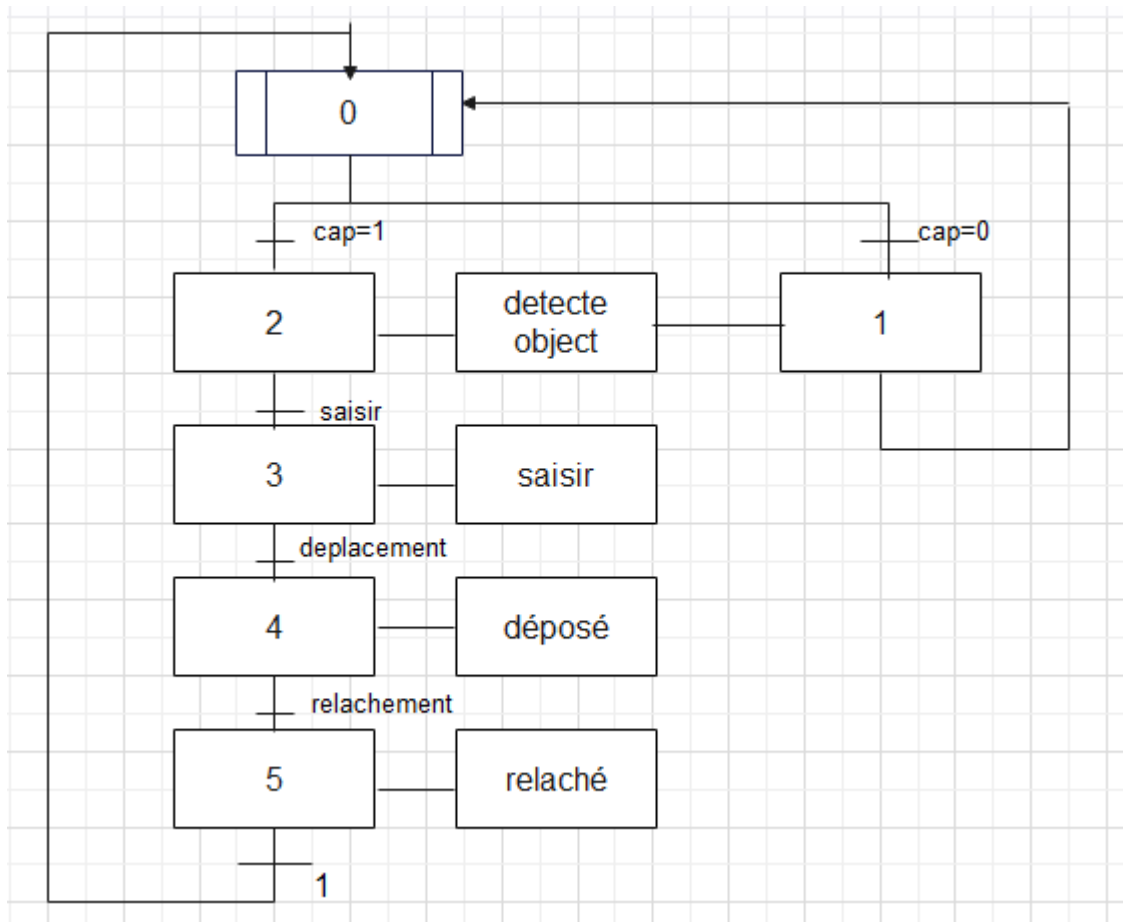


Figure 3.14. Le grafct du fonctionnement de notre bras manipulateur.

3.5.4. Quelques photos de la réalisation

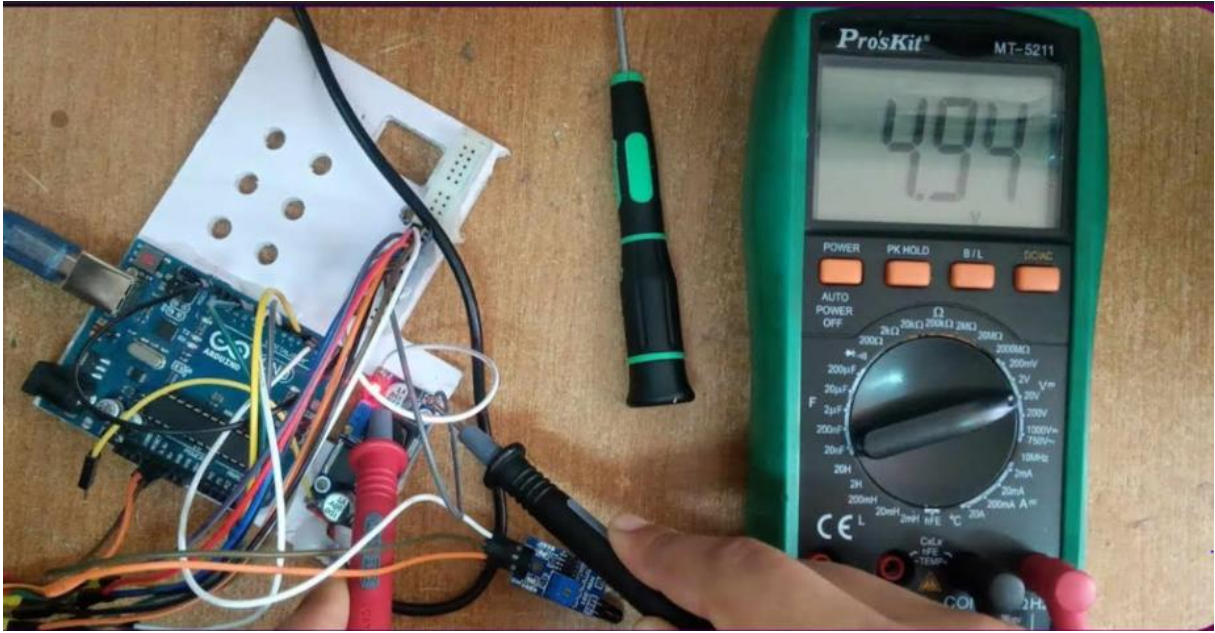
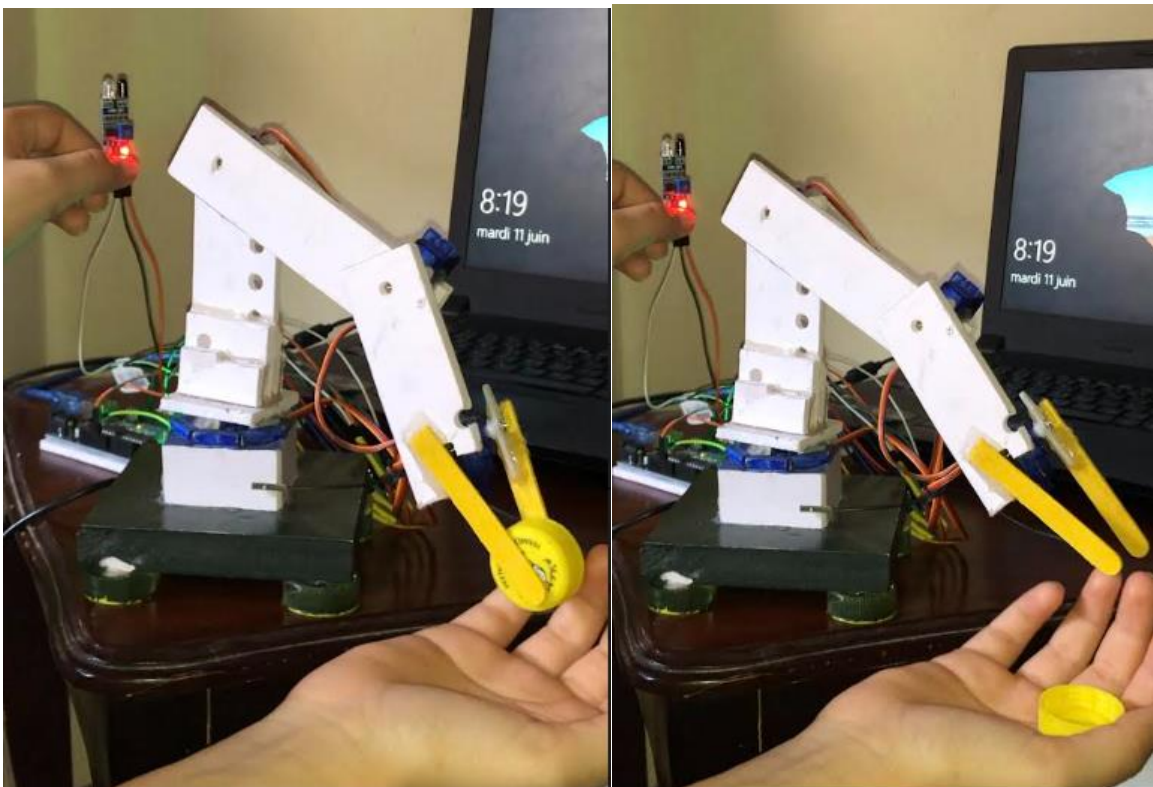


Figure 3.15. La régulation de la tension d'alimentation.



(a)

(b)

Figure 3.16. Vue latérale du bras en position de maintien, (b) vue latérale du bras en position de dépôt.

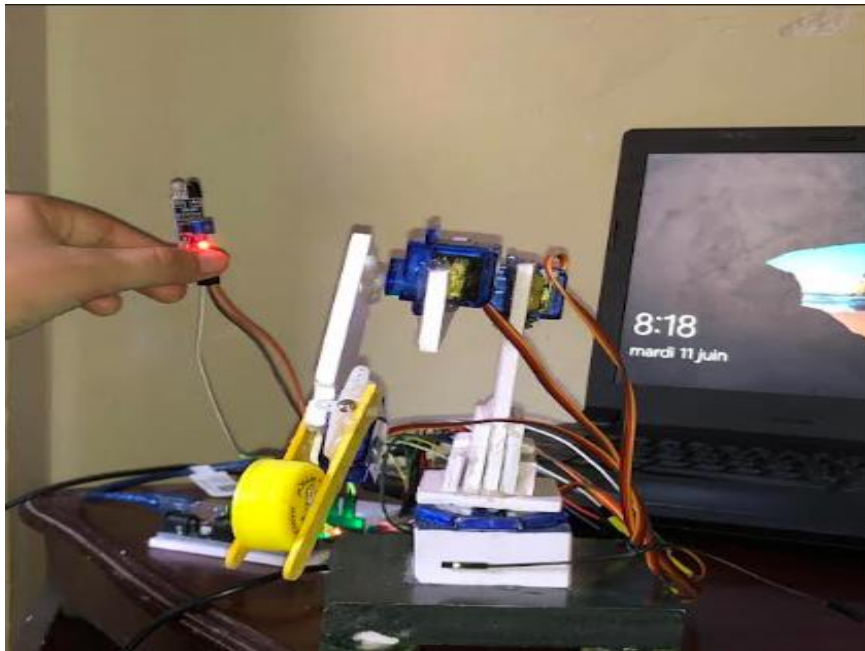


Figure 3.17. Vue de face de bras en position de maintien.

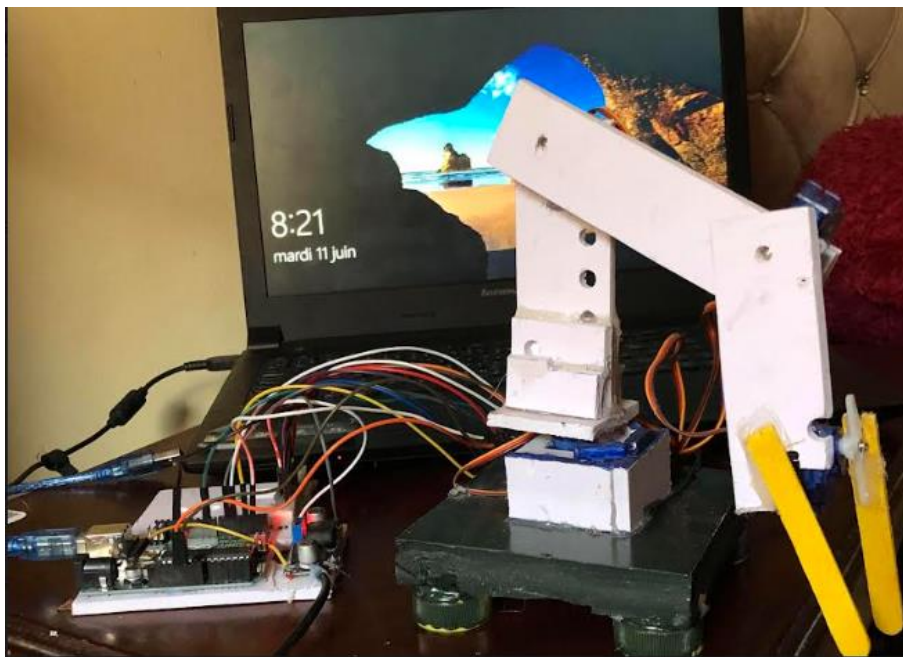


Figure 3.18. Vue de face de bras en position initiale.

3.6. La commande PID

3.6.1. Régulateur PID

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois terme P, I et D d'où le 'p' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et

'D'pour terme dérivé de la commande. Les régulateur PID sont probablement les plus largement utilisés dans l'industrie.

Même les plus complexe système de contrôle est industriel put un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PID.

Le régulateur PID est une simple implémentation de retour d'information (feedback). Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégral, et il peut anticiper le futur grâce à une action dérivée. [13]

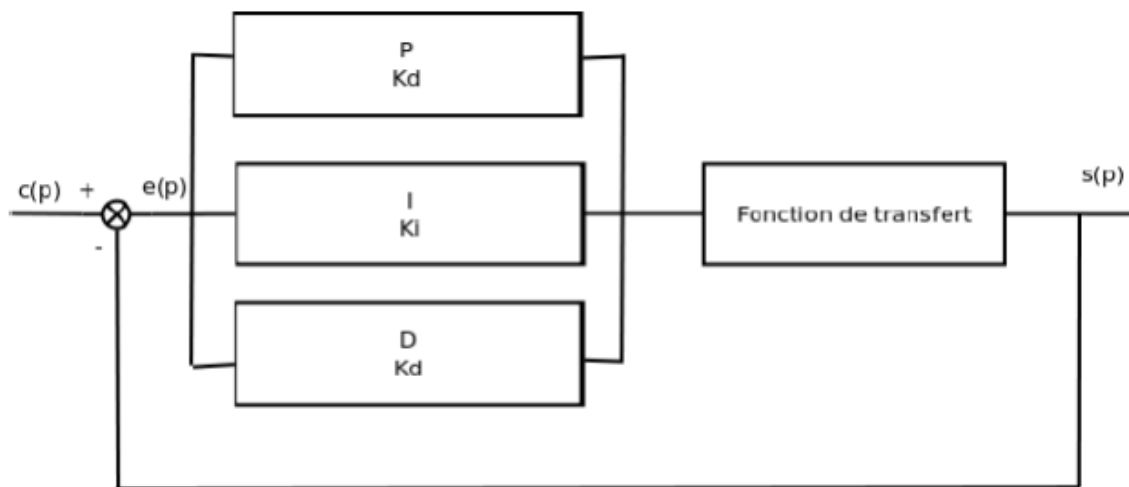


Figure 3.19. Asservissement avec régulateur PID.

3.6.1.1. L'action proportionnel

$$U(t)=K_p \times(t) \quad (3.1)$$

$$U(p)=K_p \times(p) \quad (3.2)$$

Plus la valeur K_p est élevé, plus la réponse est rapide mais on obtient une erreur statique.

La figure (3.20) [51] représente la réponse d'un échelon avec des différentes valeurs de K_p .

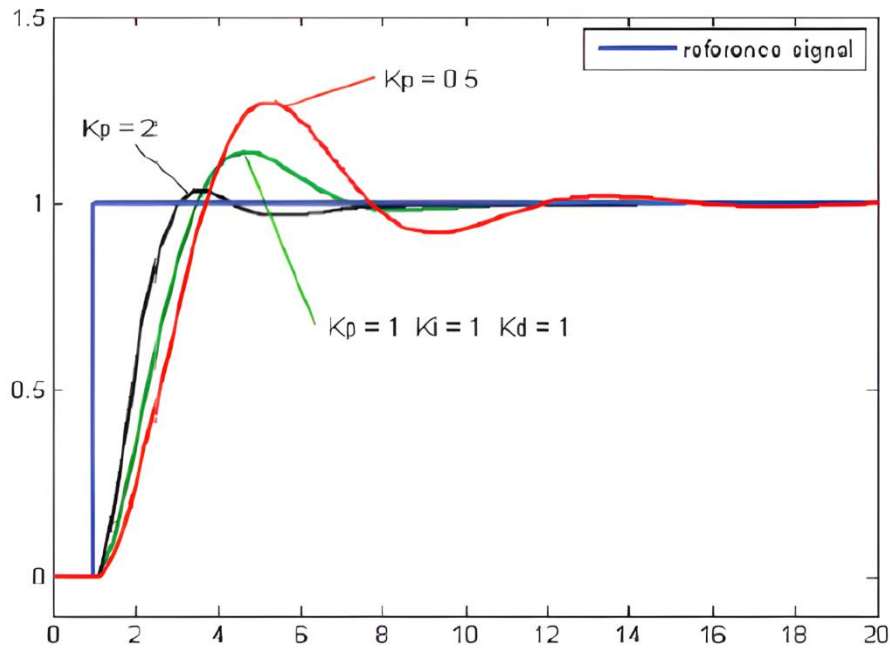


Figure 3.20. La réponse de l'action proportionnelle à échelon.

3.6.1.2. L'action intégrale

$$U(t) = K_i \times \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

$$U(p) = K_i \times (p) \quad (2.4)$$

Plus la valeur de K_i est élevée, plus l'erreur statique est corrigée.

La figure (2.21) [51] représente l'action intégrale à un échelon avec des différentes valeurs de K_i .

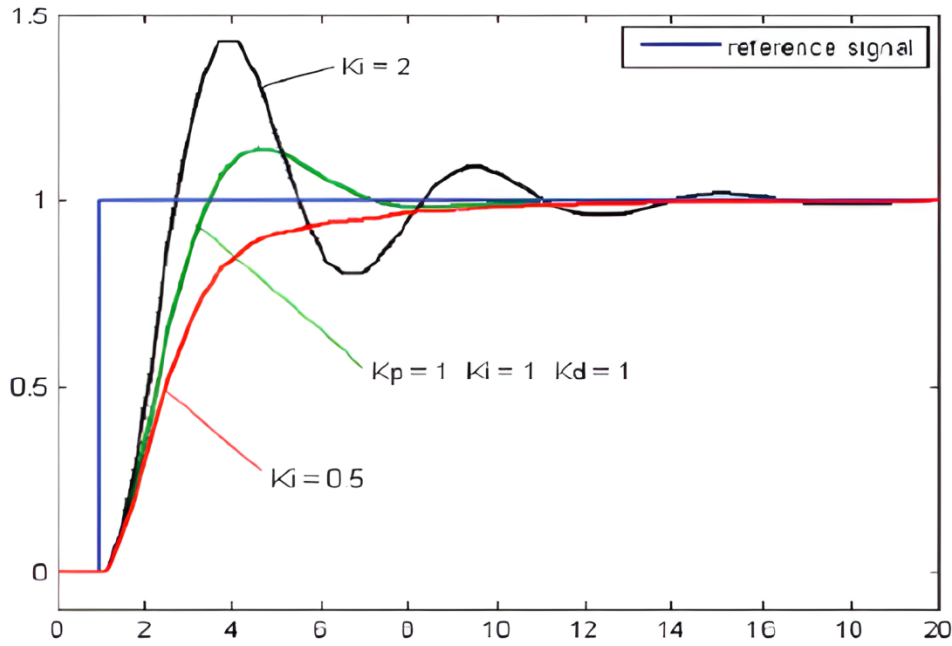


Figure 3.21. La réponse de l'action intégrale à échelon.

2.6.1.3. L'action dérivée

$$U(t) = K_d \times \frac{\partial e(t)}{\partial t} \tag{3.5}$$

$$U(p) = K_d \times (p) \times p \tag{3.6}$$

Cette action réduit le temps de stabilisation mais en même temps notre système sera sensible au bruit, la figure (2.22) [51], représente la réponse de l'action dérivée à un échelon.

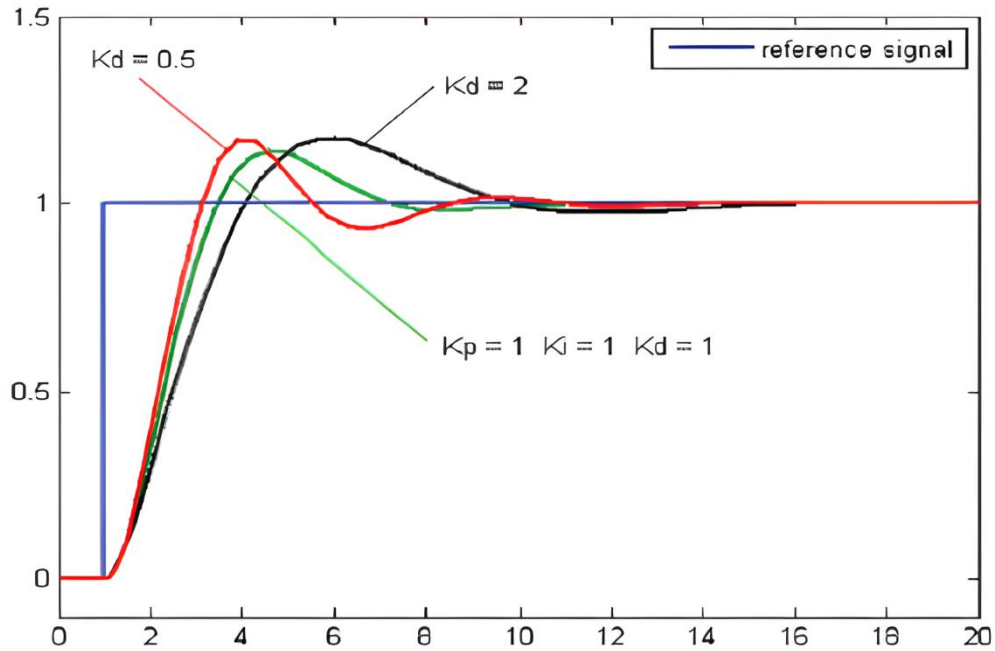


Figure 3.22. La réponse de l'action dérivé à échelon.

3.6.1.4. Simulation sous MATLAB SIMULINK de controleur PID

Nous avons remplacé les valeurs et les paramètres du moteur à courant continu (MCC) (voir la figure 3.23) dans la fonction de transfert de la position de MCC obtenu dans le chapitre 2 , et on fait la simulation du modèle .

Parameter	Value
Moment of inertia	$J_m = 0.000052 \text{ Kg.}$
Friction coefficient	$B_m = 0.01 \text{ N.ms}$
Back EMF constant	$K_b = 0.235 \frac{\text{V}}{\text{ms}^{-1}}$
Torque constant	$K_t = 0.235 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$
Electric resistance	$R_a = 2 \text{ ohm}$
Electric inductance	$L_a = 0.23 \text{ H}$

Figure 3.23. Les parametres et les valeur du MCC.

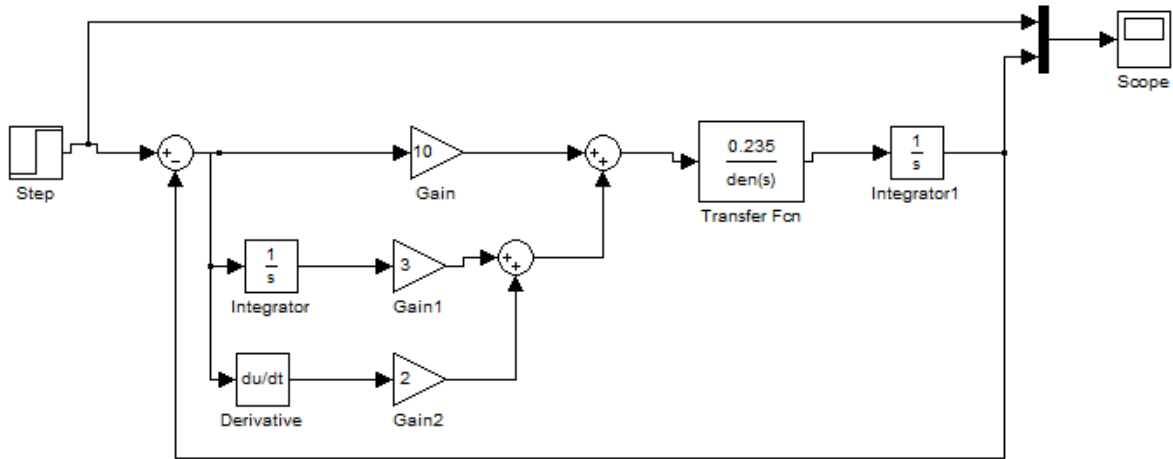


Figure 3.24. Première simulation du régulateur PID.

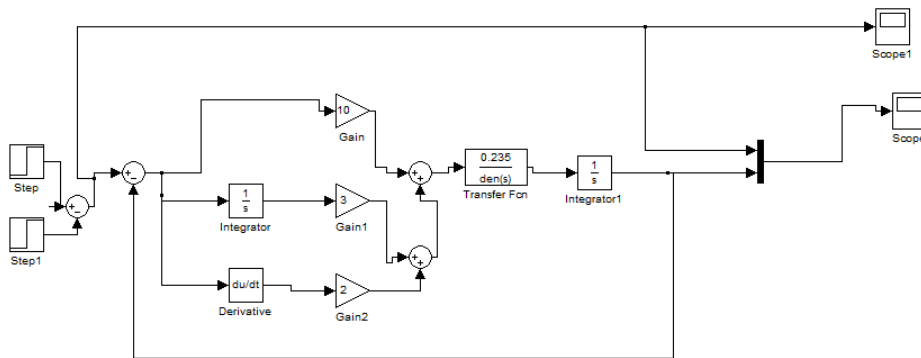
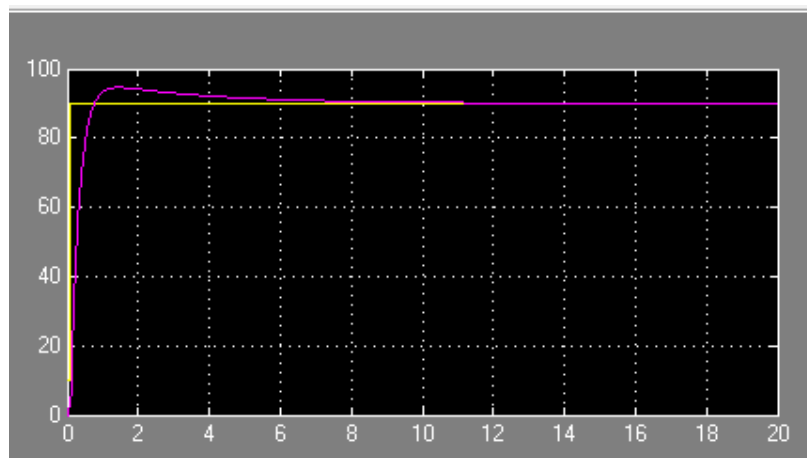
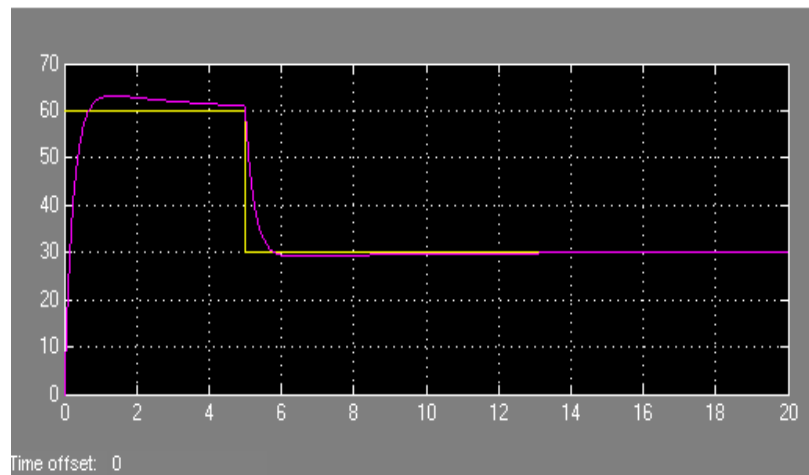


Figure 3.25. Deuxième simulation de régulateur PID.

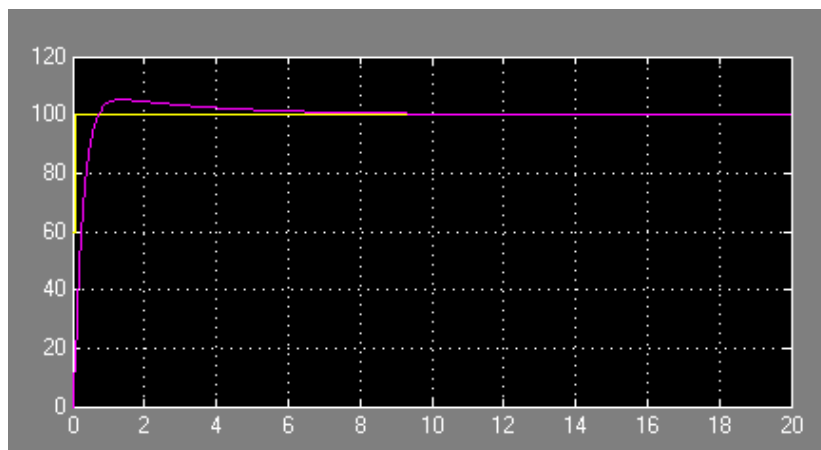
❖ Resultat de simulation



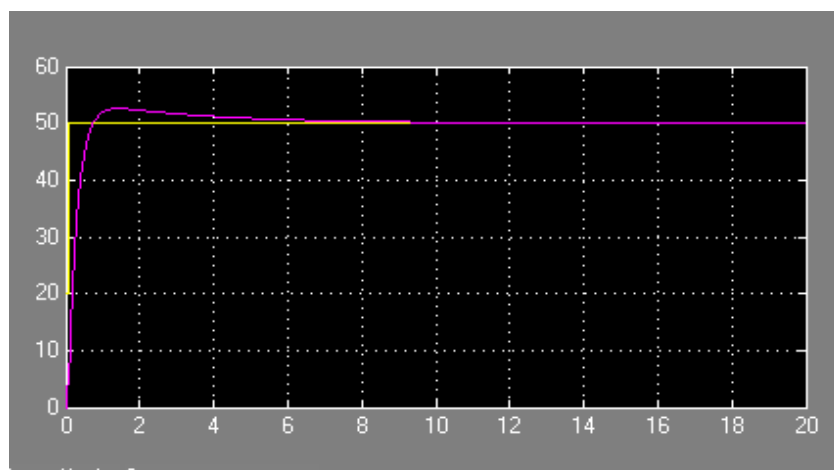
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.26. Résultat de simulation : (a) 1^{er} moteur, (b) 2^{ème} moteur, (c) 3^{ème} moteur et (d) 4^{ème} moteur.

- ❖ On remarque à partir des graphes présentés les résultats du régulateur PID de chacun des 4 servomoteurs. On a fait une simulation pour avoir la stabilisation de chaque moteur, il nous montre chacune des quatre graphes les étapes que traverse chaque moteur pour atteindre la position finale (la position désirée ou bien la stabilisation). A travers de cette simulation, nous pouvons voir l'importance de chaque aspects (intégrale, proportionnelle et intégrale) afin d'obtenir la réponse pid stable.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments constitutifs de notre bras manipulateur à quatre DDL et programmé la carte Arduino UNO contrôlé par Arduino, intégrant un capteur infrarouge pour des applications de détection et de manipulation. Cela nous a permis d'observer son fonctionnement en action lorsqu'il exécute sa tâche.

Aussi, nous avons étudié le fonctionnement théorique et pratique de la commande PID, un outil crucial pour réguler la position et maintenir la stabilité du bras manipulateur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la conception et la réalisation d'un bras manipulateur à quatre degrés de liberté, permettant de détecter des objets par infrarouge et de les déplacer d'un point A à un point B.

La particularité de ce travail est que nous avons été amenées à aborder plusieurs domaines d'étude à la fois : la mécanique, la programmation, l'électronique, et l'informatique.

Nous avons privilégié, dans notre mémoire, l'exploration de la modélisation mathématique du robot manipulateur où nous avons décrit la modélisation géométrique direct et inverse, dans le but de repérer avec précision, le bras manipulateur par rapport à son environnement réel.

Nous avons pu utiliser nos connaissances déjà acquises pendant nos cinq années d'études avec les logiciels: Isis Proteus, Matlab et Arduino.

Nous avons également présenté tous les composants utilisés pour la création de notre bras et implémenté la commande PID. A la fin, nous avons réussi à combiner toutes nos connaissances, anciennes et nouvelles, pour la réalisation notre bras manipulateur.

Le processus de notre projet nous a beaucoup enrichi, dans les aspects électroniques, mécaniques et particulièrement dans le domaine des bras manipulateurs et la programmation en temps réel.

Afin d'améliorer encore plus notre travail, nous envisageons dans un prochain travail de :

- Augmenter les degrés de liberté du bras manipulateur pour en améliorer la flexibilité.
- Intégrer des capteurs supplémentaires pour une meilleure détection et interaction avec l'environnement.
- Optimiser l'algorithme de commande pour une plus grande rapidité et précision des mouvements.
- Introduire des algorithmes d'intelligence artificielle pour plus d'autonomie du bras manipulateur.

- [1] « La robotique dans l'automatisation de la fabrication et des... » Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/robotics/industrial-robots-manufacturing-warehouse.html>
- [2] « Le robot Unimate qui a révolutionné le monde technologique - KOHA.net ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.koha.net/fr/tech/331522/roboti-unimate-qe-beri-revolucion-ne-boten-teknologjike>
- [3] « History-of-robots - Wikipedia ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://en.wikipedia.org/wiki/History-of-robots>
- [4] « Origine - Évolution », tpe2016. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://tpe-1es3.wixsite.com/tpe2016/blank-x0tyr>
- [5] E. rédactionelle, « Dernier tour de piste pour le robot Asimo », Planète Robots. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.planeterobots.com/2022/04/01/dernier-tour-de-piste-pour-le-robot-asimo/>
- [6] « Silver robotic arm - Buy Your Robot », Buyyourrobot. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.buyyourrobot.com/downloads/silver-robotic-arm/>
- [7] « iRobot Roomba 675 Robot Aspirateur ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.robot-advance.com/art-irobot-roomba-671-robot-aspirateur-3663.htm>
- [8] « 2021-guide-de-la-robotique-staubli.pdf ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.imerir.com/content/uploads/2021/05/2021-guide-de-la-robotique-staubli.pdf>
- [9] « Technologies révolutionnaires – robotique et propriété intellectuelle ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.wipo.int/wipo_magazine/fr/2016/06/article_0002.html
- [10] « Application, développement et opportunités futures des robots collaboratifs (Cobots) dans la fabrication : une revue de la littérature : International Journal of Human-Computer Interaction : Vol 40, No 4 ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2022.2041907>
- [11] « L'essor de la robotique en trois formations », FUN MOOC. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fun-mooc.fr/fr/actualites/lessor-de-la-robotique-en-trois-formations/>
- [12] « Cobots - MATLAB & Simulink ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://nl.mathworks.com/discovery/cobots.html>

- [13] « Lancement du premier service de livraison régulier par drône | DHLExpress.fr ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dhlexpress.fr/actualites/lancement-du-premier-service-de-livraison-regulier-par-drone>
- [14] « Définition | Voiture autonome - Véhicule autonome - Véhicule automatisé ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/voiture-autonome-voiture-autonome-15601/>
- [15] « Robot de nettoyage électrique ou hydraulique ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://piscinedunord.fr/robot-nettoyage-piscine-electrique-hydraulique.php>
- [16] « Robot Tondeuse - BestofRobots ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bestofrobots.fr/robot-jardin/tondeuses-robots.html>
- [17] « Vecteurs et illustrations de Robot humanoïde personnel en téléchargement gratuit | Freepik ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.freepik.com/vecteurs/robot-humoide-personnel>
- [18] T. Berthier, « Les enjeux d'intégration de l'intelligence artificielle et de la robotique militaire sur le champ de bataille ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aren24.news/2023/05/18/les-enjeux-dintegration-de-lintelligence-artificielle-et-de-la-robotique-militaire-sur-le-champ-de-bataille/>
- [19] A. Abnoue, « Les robots agricoles révolutionnent l'agriculture 2023 ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.moussasoft.com/robotique-agriculture-farming/>
- [20] « Agriculture : le rôle clé de la robotique | vie-publique.fr ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vie-publique.fr/en-bref/285381-agriculture-le-role-cle-de-la-robotique>
- [21] « Robotique industrielle : les robots au service des entreprises ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://trustmyscience.com/robotique-industrielle-robots-service-entreprises/>
- [22] « Cours de Robotique ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.gdrrobotique.org/cours_de_robotique/?id=5c1b55b7ea7a82038b46c55910753954
- [23] MANSOURI,R. KHELID,A., « Conception et réalisation d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté commandé par la carte Arduino UNO », mémoire Master UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2015.
- [24] BOUZIR,R. KACIMI,A., « Réalisation d'un bras manipulateur à base d'Arduino », mémoire master UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA, 2019.

- [25] Ghebouli, Y. Benyahia,., « Réalisation & Commande d'un prototype de Robot Palettiseur ABB-IRB460 », mémoire Master Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj, 2022.
- [26] ABDELAZIZ ,S et ISSAOUNI, S. « Realisation et commande d'un bras manipulateur par l'interface d'axe turbo umac », mémoire master Ecole nationale polytechnique, 2004
- [27] Hamdi Hocine, introduction à la robotique, Édition de l'université Mentouri-Constantine.
- [28] « Evolution du manipulateur Dalmec Micropartner MI ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.machine-outil.com/actualites/t378/a6305-m-dalmec.html>
- [29] « Le robot programmable TI-InnovatorTM », Maison des calculatrices. Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://maisondelacalculatrice.fr/fr/accueil/51-le-robot-programmable-ti-innovator-.html>
- [30] « Qu'est-ce qu'un robot "intelligent" ? - LeoTronics Robotics ». Consulté le: 6 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://leotronics.eu/fr/notre-blog/quest-ce-quun-robot-intelligent>
- [31] BENKHELLAT, M. CHELABI, B., « conception et réalisation d'un bras manipulateur à base de l'ARDUINO », mémoire master UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAIA, 2018.
- [32] Bruno Siciliano et Oussama Khatib, Springer Handbook of Robotics, 2^e éd., Springer, 2016.
- [33] MOUSSAOUI , A., « Conception et réalisation d'un bras manipulateur commandé par l'Arduino Méga », mémoire Master Université M'hamed Bougara, Boumerdes 2017.
- [34] CHEHAIDIA , S., « Modilisation et commande d'un robot à six degré de liberté », mémoire Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.
- [35] P. COIFET, et A. KHEDDAR, « Télé-opération et télé-robotique », Traité IC2, série Systèmes automatisés, Hermès, 2002.
- [36] A. Daoudi, cour Mécanique pour la robotique arm32, USTHB. 2012.
- [37] Electrosystème, première STI - H. Ney - édition Nathan technique 1996.
- [38] « MCC ». Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://web.enib.fr/~kerhoas/mcc.html>
- [39] « Arduino : comment l'utiliser débiter, apprendre et réaliser des applications ». Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.positron-libre.com/electronique/arduino/>

- [40] KRAMA ,A., GOUGUI,, « Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde », Mémoire master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2015.
- [41] « Le grand livre d'Arduino » par Patrick Chantereau et Erik Bartmann, éd. Eyrolles, 2014.
- [42] « Arduino, Apprivoisez l'électronique et le codage » par Jean-Christophe Quetin, éd. ENI, 2018.
- [43] « Apprendre Arduino - Description de la carte Arduino UNO - BenTeK.fr ». Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://bentek.fr/2-arduino-uno/>
- [44] « Le servomoteur », arduino-passion. Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pecquery.wixsite.com/arduino-passion/le-servomoteur>
- [45] Achour H., Mohammed Seghir., M., « Conception et réalisation d'un bras manipulateur a 3 degré de liberté »,mémoire master Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017.
- [46] LM2596 DC-DC Module Abaisseur Regulateur Tension, Bastelgarage.ch, consulté le 07 juin 2024, <https://www.bastelgarage.ch/module-de-convertisseur-abaisseur-dc-dc-lm2596-avec-affichage>.
- [47] Alicia78, « Plaque d'essai ou breadboard/protoboard », Le Disrupteur Dimensionnel. Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ledisrupteurdimensionnel.com/arduino/plaque-dessai-ou-breadboard-protoboard/>
- [48] « Capteurs infrarouges | Comment ça marche, application et avantages ». Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/capteurs-infrarouges/>
- [49] TOURE Mohamed Lamine, "Cours de Proteus professional (ISIS & ARES)," Université d'Annaba, 2024
- [50] Bartmann, E. (2022). Le grand livre d'Arduino. Eyrolles
- [51] Melle. Fodil R.,elle. Sayah ,K., « Réalisation et Commande d'un Bras Manipulateur à Quatre Degrés de Liberté », mémoire master UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2017.