



جامعة عباس لغرور خنشلة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة الصناعية

Université Abbès LAGHROUR Khenchela

Faculté des Sciences & de la Technologie

Département de Génie Industriel



## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (LMD)*

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

# Réalisation et conception d'un bras manipulateur à base d'une carte arduino.

*Réalisé par : - KEZIZ Zoubir*

*Dirigé par : Pr. BOUOUDEN Sofiane*

*- DJEBAILI Younes*

*Membres du Jury :*

*Dr. Fouad ALLOUANI (MCA)*

*Président*

*Dr. Khalil MOKHTARI (MCB)*

*Examineur*

*Année universitaire 2021/2022*

## **Remerciement**

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

On tient à exprimer à notre promoteur Pro. BOUOUDEN SOFIANE, notre  
Profonde gratitude et toutes nos reconnaissances pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa  
patience durant la période de l'encadrement.

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

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

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes très chers parents pour leur soutien infaillible durant toutes mes années d'études
- Mes frères et mes sœurs
- Toute ma famille sans exception
- Mon professeur BOUOUDEN SOFIANE
- Tous ceux qui m'aiment
- Mon binôme YOUNES
- Toute la promotion d'automatisation 2021\_2022

**KEZIZ ZOUBIR.**

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes très chers parents pour leur soutien infaillible durant toutes mes années d'études
- Mes frères et mes sœurs
- Toute ma famille sans exception
- Mon professeur BOUOUDEN SOFIANE
- Tous ceux qui m'aiment
- Mon binôme ZOUBIR
- Toute la promotion d'automatisation 2021\_2022

**DJEBAILI YOUNES**

### الملخص

سمح لنا من خلال مذكرة التخرج التي انجزناها بدراسة وانجاز مناورة ذراع روبوت ذو أربع درجات للحرية يتميز الروبوت ببنية مفصلية تتحرك بواسطة السرفوموتور ومحرك خطوة بخطوة وتتحكم بها بطاقة اردوينو

لقد استعملنا في هذا العمل حساسات ومستشعرات: حساس التعرف على الألوان ومستشعر القرب بالأشعة تحت الحمراء والذي بدوره يقوم بتحسس واستشعار القطع عند وصولها عند الذراع المناور ومنه يقوم الذراع المناور بفرز القطع ووضع كل قطعة في سلة علي حسب لونها وذلك باستعمال حساس التعرف على الالوان

كما قمنا بإنشاء واجهة بيانات باستعمال برنامج اردوينو لتحكم المستعمل لروبوت المناور

كلمات مفتاحية : ذراع مناور، ذراع الي، ذراع اوتوماتيكي

### Résumé

Ce projet de fin d'études nous a permis à étudier et à mettre en œuvre une manœuvre de bras de robot à quatre degrés de liberté.

Dans ce travail, nous avons utilisé des capteurs tels que : le capteur de reconnaissance des couleurs et le capteur de proximité infrarouge, qui à son tour détecte les pièces lorsqu'elles arrivent au bras manipulateur, et à partir de là, le bras manipulateur trie les pièces et place chaque pièce dans un panier. Selon sa couleur, à l'aide du capteur de reconnaissance de couleurs.

Nous avons également créé une interface de données à l'aide du logiciel de contrôle utilisateur Arduino pour le robot manipulateur.

Mots clés : bras manipulateur, bras robotisé, bras automatique.

### Abstract

This project allowed us to study and implement a robot arm maneuver with four degrees of freedom.

In this work, we used sensors such as: the color recognition sensor and the infrared proximity sensor, which in turn detects the parts as they arrive at the manipulator arm, and from there the manipulator arm sorts the pieces and places each piece in a basket. according to its color, using the color recognition sensor.

We also created a data interface using Arduino user control software for the manipulator robot.

Keywords: manipulator arm, robotic arm, automatic arm.

# Sommaire :

Sommaire :

Introduction générale ..... (01)

## Chapitre 01 : Généralités sur les robots.

I.1 : Introduction..... (02)

I.2 : Définition..... (02)

I.2.1 : Le robot..... (02)

I.2.2 : Définition de la robotique..... (02)

I.2.3 : L'histoire de la robotique..... (02)

I.3 : Types des robots..... (05)

I.3.1 : Robots mobiles..... (05)

I.3.2 : Robots manipulateurs..... (06)

I.3.3 : Robots industriels..... (06)

I.4 : Composants d'un système robotique..... (06)

I.4.1 : Unité opérationnelle..... (06)

I.4.2 : Unité informationnelle..... (07)

I.5 : Bras manipulateur..... (07)

I.5.1 : Architecteur d'un bras manipulateur..... (08)

I.5.1.1 : Base..... (08)

I.5.1.2 : Porteur ..... (08)

I.5.1.3 : Segment..... (08)

I.5.1.4 : Articulation..... (08)

I.6 : Constituant d'un robot..... (08)

I.6.1 : Les actionneurs..... (09)

I.6.2 : Le système mécanique articulé (S.M.A.) ..... (09)

I.6.2.1 : Structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple..... (09)

I.6.2.2 : Structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée..... (10)

I.6.3 : Articulation rotoïde..... (10)

I.6.4 : Articulation prismatique..... (10)

I.6.5 : Organe terminal..... (11)

I.6.6 : Les capteurs..... (11)

I.6.7 : La commande..... (11)

I.7 : Classification des robots..... (11)

<b>I.7.1</b> : Classification fonctionnelle.....	(12)
<b>I.7.1.1</b> : Manipulateur à commande manuelle.....	(12)
<b>I.7.1.2</b> : Manipulateur automatique.....	(12)
<b>I.7.1.3</b> : Robots programmables.....	(13)
<b>I.7.1.4</b> : Robots intelligents.....	(13)
<b>I.7.2</b> : Classification géométrique.....	(14)
<b>I.7.2.1</b> : Structure cartésienne (PPP).....	(14)
<b>I.7.2.2</b> : La structure cylindrique (RPP) ou (PRP).....	(14)
<b>I.7.2.3</b> : Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale : (RRP).....	(15)
<b>I.7.2.4</b> : La structure dite SCARA.....	(15)
<b>I.7.2.5</b> : Structure dite SCARA.....	(16)
<b>I.8</b> : Domaines d'application.....	(16)
<b>I.8.1</b> : Tâches simples.....	(16)
<b>I.8.2</b> : Tâches complexes.....	(17)
<b>I.9</b> : Avantages & Inconvénients des robots.....	(17)
<b>I.9.1</b> : Avantages.....	(17)
<b>I.9.2</b> : Inconvénients.....	(17)
<b>I.10</b> : Conclusion.....	(18)

## **Chapitre 02 : Modélisation d'un bras manipulateur**

<b>II.1</b> : Introduction.....	(19)
<b>II.2</b> : Modélisation d'un bras manipulateur.....	(19)
<b>II.2.1</b> : Présentation du bras manipulateur.....	(19)
<b>II.2.2</b> : Notion de position.....	(19)
<b>II.2.3</b> : Coordonnées cartésiennes.....	(19)
<b>II.2.4</b> : Coordonnées polaires.....	(20)
<b>II.2.5</b> : Coordonnées cylindriques.....	(21)
<b>II.2.6</b> : Coordonnées sphériques.....	(21)
<b>II.2.7</b> : Coordonnées homogènes.....	(22)
<b>II.2.8</b> : Transformation homogène.....	(22)
<b>II.2.8.1</b> : Transformations homogènes des repères.....	(23)

<b>II.2.8.2</b> : Matrice de translation pure homogène.....	(23)
<b>II.2.8.3</b> : Matrice de rotation homogène.....	(24)
<b>II. 2.9</b> : Modèle Géométrique.....	(25)
<b>II. 2.9.1</b> : Modèle Géométrique direct.....	(25)
<b>II.2.9.2</b> : Paramètre de DENAVET- HARTENBERG (D-H).....	(25)
<b>II.2.9.3</b> : Modélisation du bras manipulateur réalisé.....	(26)
<b>II.2.9.4</b> . Identification des paramètres de DH de BM1 réalisé.....	(27)
<b>II.2.9.5</b> : Le modèle géométrique inverse (MGI).....	(29)
<b>II.3</b> : Modélisation du moteur électrique à courant continu.....	(31)
<b>II .3.1</b> : Les équations électromécaniques.....	(31)
<b>II .3 .2</b> : Modèle d'état du moteur.....	(32)
<b>II.4</b> . Description de la partie mécanique du bras manipulateur.....	(34)
<b>II.4.1</b> . Structure mécanique du bras.....	(34)
<b>II.4.1.1</b> . La base.....	(35)
<b>II.4.1.2</b> : Arrière-bras.....	(36)
<b>II.4.1.3</b> : Avant-bras.....	(36)
<b>II.4.1.4</b> : Poignet.....	(36)
<b>II.4.1.5</b> : La pince.....	(36)
<b>II.4.2</b> : Le bras manipulateur assemblé.....	(37)
<b>II.4.3</b> : Les organes constitutifs d'un bras manipulateur.....	(38)
<b>II.4.3.1</b> : Actionneurs.....	(38)
<b>II.4.3.2</b> : Transmission entre articulations (engrenages).....	(38)
<b>II.4.3.3</b> : Les capteurs.....	(39)
<b>II.5</b> : CONCLUION.....	(40)

### **Chapitre 03 : Conception et réalisation d'un bras manipulateur**

<b>III.1</b> : Introduction.....	(41)
<b>III.2</b> : <b>Partie 1 : Conception matérielle et logiciel</b> .....	(41)
<b>III.2.1</b> : Introduction.....	(41)
<b>III.2.2</b> : Hardware.....	(41)
<b>III.2.2.1</b> : La carte d'Arduino.....	(41)
<b>III.2.2.1.1</b> : Arduino méga 2560.....	(41)
<b>III.2.2.2</b> : Les actionneurs.....	(43)
<b>III.2.2.2.1</b> : les servomoteurs.....	(43)
<b>III.2.2.2.1.1</b> : Paramètres techniques de servomoteur MG90S.....	(44)
<b>III.2.2.2.1.2</b> : Branchement Servomoteur avec La carte Arduino.....	(45)
<b>III.2.2.2.2</b> : Moteur Pas à Pas.....	(45)
<b>III.2.2.2.2.1</b> : Moteur Pas à Pas 28BYJ-48.....	(46)
<b>III.2.2.2.2.2</b> : Caractéristiques.....	(46)
<b>III.2.2.2.3</b> : Module Driver ULN2003.....	(47)
<b>III.2.2.2.3.1</b> : Caractéristiques Driver ULN2003A.....	(47)
<b>III.2.2.2.3.2</b> Brochage du Moteur Pas a Pa et Module Driver ULN2003 avec La carte Arduino....	(47)
<b>III.2.2.3</b> : Les Captures.....	(48)
<b>III.2.2.3.1</b> : capteurs de proximité infrarouge FC51.....	(48)
<b>III.2.2.3.1.1</b> Le placement et sa fonctionnement captures de proximité infrarouge FC51.....	(49)
<b>III.2.2.3.1.2</b> : Caractéristiques.....	(50)
<b>III.2.2.3.1.3</b> : Schéma du capteur proximité infrarouge FC51.....	(50)
<b>III.2.2.3.1.4</b> : brochage de capteurs de proximité infrarouge FC51.....	(50)
<b>III.2.2.3.2</b> : Capteur de couleur TSC230.....	(51)
<b>III.2.2.3.2.1</b> : Caractéristiques.....	(51)
<b>III.2.2.3.2.2</b> . Le placement et sa fonctionnement captures de couleur tsc230.....	(52)
<b>III.2.2.3.2.3</b> Schéma du capteur de couleur tsc230.....	(53)
<b>III.2.2.3.2.4</b> : brochage de capteurs De couleur TSC230.....	(54)
<b>III.2.2.4</b> : Fils de connexion.....	(54)

<b>III.2.2.5</b> : Les LED.....	(55)
<b>III.2.2.6</b> : Botton poussoir.....	(55)
<b>III.2.2.7</b> : Les résistances.....	(56)
<b>III.2.3</b> : Software.....	(57)
<b>III.2.3.1</b> : logiciel FRITZING.....	(57)
<b>III.2.3.1.1</b> : Implémentation et simulation du projet sous FRITZING.....	(57)
<b>III.2.3.1.2</b> : Présentation du logiciel FRITZING.....	(57)
<b>III.2.3.1.3</b> Etapes de création des schémas électriques.....	(58)
<b>III.2.3.1.4</b> : Description du branchement de BM.....	(58)
<b>III.2.3.2</b> Logiciel Arduino IDE.....	(59)
<b>III.2.3.2.1</b> : Programmes Arduino.....	(59)
<b>III.2.3.2.2</b> : Structure générale du programme (IDE Arduino).....	(60)
<b>III.2.3.2.3</b> : Organigramme de notre commande du BM.....	(61)
<b>III.2.3.4</b> : Logiciel Blender.....	(62)
<b>III.2.3.4.1</b> : Présentation du logiciel Blender.....	(62)
<b>III.2.3.4.2</b> : La conception des partie de notre roboT.....	(62)
<b>III.2.3.4.2.1</b> : La base de BM.....	(63)
<b>III.2.3.4.2.2</b> : Les différentes articulations de BM.....	(63)
<b>III.2.3.4.2.3</b> : Les différentes engrenages de BM.....	(64)
<b>III.2.3.4.2.4</b> : L'outil final (Pince).....	(64)

### **III.3 : Partie 2 : Réalisation**

<b>Pratique</b> .....	(65)
<b>III.3.1</b> : Introduction.....	(65)
<b>III.3.2</b> : Structure mécanique du bras manipulateur.....	(65)
<b>III.3.3</b> : Réalisation bras manipulateur.....	(65)
<b>III.3.3.1</b> : Différentes parties du robot.....	(66)
<b>III.3.3.1.1</b> : La base.....	(66)
<b>III.3.3.1.2</b> : Les corps de bras.....	(67)

<b>III.3.3.1.3</b> : Le pince.....	(68)
<b>III.3.3.2</b> : Assemblage complet du bras manipulateur.....	(69)
<b>III.3.4</b> : Réalisation de tapis roulante.....	(69)
<b>III.4</b> : Travail avec le bras manipulateur .....	(02)
<b>III.5</b> Le code.....	(02)
<b>III.6</b> . Remarque	
<b>III.7</b> . Utilisations du bras manipulateur dans le cas de notre projet.....	(02)
<b>III.8</b> : Conclusion.....	(02)
Conclusion générale .....	(02)
Référence .....	(02)

## Liste des Figures :

### Chapitre 01 : Généralités sur les robots .

<b>Fig.I.1.</b> De gauche à droite : (a) Horloge a eau de Clepsydre, (b) Théâtre mobile de Héron D'Alexandrie, (c) Canard digérateur de Jacques de Vaucanson .....	(03)
<b>Fig.I.2.</b> Unimate, premier robot industriel .....	(03)
<b>Fig.I.3.</b> Opportunity .....	(04)
<b>Fig.I.4.</b> Robonaut .....	(04)
<b>Fig.I.5.</b> Graphique représentant l'estimation des expéditions annuelles mondiales de robots industriels par régions .....	(05)
<b>Fig.I.6.</b> Robots mobiles.....	(05)
<b>Fig.I.7.</b> Robot manipulateur.....	(06)
<b>Fig.I.8.</b> Structure fonctionnelle d'un robot .....	(07)
<b>Fig.I.9.</b> Architecture d'un robot.....	(08)
<b>Fig.I.10.</b> Constituant d'un robot .....	(10)
<b>Fig.I.11 :</b> SMA à chaîne cinématique série et fermée ... ..	(10)
<b>Fig.I.12.</b> Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes .....	(10)
<b>Fig.I.13.</b> Représentation d'une articulation prismatique sus ses différentes formes.....	(11)
<b>Fig.I.14.</b> Manipulateur à commande manuelle. ....	(12)
<b>Fig.I.15.</b> Manipulateur automatique. ....	(12)
<b>Fig.I.16.</b> Robot programmable .....	(13)
<b>Fig.I.17.</b> Robot intelligent. ....	(14)
<b>Fig. I.18.</b> Structure d'un Robot cartésien. ....	(14)
<b>Fig.1.19.</b> Structure RPP.....	(15)
<b>Fig.I.20.</b> Structure d'un robot sphérique.....	(15)
<b>Fig.1.21.</b> Structure RRR.....	(16)
<b>Fig.I.22.</b> Structure d'un robot SCARA.....	(16)

### Chapitre 02 : Modélisation d'un bras manipulateur

<b>Fig.II.1.</b> Coordonnées cartésiennes.....	(20)
<b>Fig.II.2.</b> Coordonnées polaires.....	(20)
<b>Fig. II.3.</b> Système de coordonnées cylindriques.....	(21)

<b>Fig.II.4.</b> Système de coordonnées sphérique.....	(22)
<b>Fig.II.5.</b> Transformation des repères .....	(23)
<b>Fig.II.6.</b> Transformation de translation pure .....	(24)
<b>Fig.II.7.</b> (exemple de rotation )Transformation de rotation pure autour de l'axe x .....	(24)
<b>Fig.II.8.</b> Placement des repères et notation du bras manipulateur.....	(27)
<b>Fig.II.9.</b> Les vecteurs des variables articulaires.....	(30)
<b>Fig.II.10.</b> Représentation schématique du moteur CC.....	(31)
<b>Fig.II.11.</b> Schéma fonctionnel du moteur CC.....	(34)
<b>Fig.II.12.</b> Les pièces du bras manipulateur sous Blender 3D.....	(35)
<b>Fig.II.13.</b> Base du BM1. ....	(35)
<b>Fig.II.14.</b> L'épaule, le coude et le poignet du BM1. ....	(36)
<b>Fig.II.15.</b> Pince du BM1.....	(37)
<b>Fig.II.16.</b> BM1 assemble. ....	(37)
<b>Fig.II.17.</b> Différents types d'engrenage.....	(38)

### **Chapitre 03 : Conception et réalisation d'un bras manipulateur**

<b>Fig.III.1.</b> Arduino Mega.....	(42)
<b>Fig.III.2.</b> Exemple de signal en position pour un servomoteur (PWM). ....	(44)
<b>Fig.III.3.</b> Servomoteur de type MG90S .....	(44)
<b>Fig.III.4</b> Branchement Servomoteur avec La carte Arduino .....	(45)
<b>Fig.III.5.</b> Moteur Pas n'a Pas 28BYJ-48 .....	(46)
<b>Fig.III.6</b> ULN2003 .....	(47)
<b>Fig.III.7</b> Branchement Moteur Pas n'a Pas avec La carte Arduino.....	(47)
<b>Fig.III.8.</b> Capteurs de proximité infrarouge FC51.....	(48)
<b>Fig.III.9.</b> Le placement captures de proximité infrarouge FC51.....	(49)
<b>Fig.III.10.</b> Principe de fonctionnement de capteur FC51.....	(49)
<b>Fig.III.11.</b> shéma proximité infrarouge FC51.....	(50)
<b>Fig.III.12.</b> Brochage de capteurs de proximité infrarouge .....	(50)
<b>Fig.III.13.</b> Capteur De Couleur TSC230.....	(51)
<b>Fig.III.14.</b> Le placement capture de couleur Tsc230.....	(52)
<b>Fig.III.15.</b> fonctionnement de capteur de couleur tsc230 .....	(53)
<b>Fig.III.16.</b> Schéma du capteur de couleur tsc230.....	(53)

<b>Fig.III.17 Brochage de capteurs De couleur TSC230 .....</b>	<b>(54)</b>
<b>Fig.III.18. Fils de connexion.....</b>	<b>(54)</b>
<b>Fig.III.19. LED .....</b>	<b>(55)</b>
<b>Fig.III.20. Botton poussoir .....</b>	<b>(55)</b>
<b>Fig.III.21. les différents types de résistances.....</b>	<b>(56)</b>
<b>Fig.III.22. De gauche à droite (A) Logiciel Proteus Fritzing, (B) Interface de Fritzing... </b>	<b>(57)</b>
<b>Fig.III.23. Organigramme des étapes de la saisie des schémas.....</b>	<b>(58)</b>
<b>Fig.III.24. Branchement total du BM.....</b>	<b>(59)</b>
<b>Fig. III.25. Interface d’Arduino IDE 2.0 .....</b>	<b>(60)</b>
<b>Fig.III.26 Structure générale du programme (IDE Arduino) .....</b>	<b>(60)</b>
<b>Fig.III.27 Organigramme de notre commande du BM1 .....</b>	<b>(61)</b>
<b>Fig. III.28. Interface Logiciel Blender.....</b>	<b>(62)</b>
<b>FigIII.29 La Base de Notre BM.....</b>	<b>(63)</b>
<b>FigIII.30 Les différentes articulations de bras manipulateur .....</b>	<b>(63)</b>
<b>FigIII.31 Les différentes engrenages de BM.....</b>	<b>(64)</b>
<b>Fig.III.32 L’outil final (pince) du BM.....</b>	<b>(64)</b>
<b>Fig.III.33. Imprimant 3D creality “CR-10” .....</b>	<b>(65)</b>
<b>Fig.III.34. La Vue de dessus et de face de la base .....</b>	<b>(66)</b>
<b>Fig.III.35. Vue de dessus de la base.....</b>	<b>(66)</b>
<b>Fig.III.36. Les déférents parties de cops du bras.....</b>	<b>(67)</b>
<b>Fig.III.37. Vue de dessus du corps du bras placé sur la base.....</b>	<b>(68)</b>
<b>Fig.III.38 Vue de dessous de la pince.....</b>	<b>(68)</b>
<b>Fig.III.39 : Assemblage complet du bras manipulateur.....</b>	<b>(69)</b>
<b>Fig.III.40 1<sup>er</sup> Capteur IR détecter la pièce.....</b>	<b>(70)</b>
<b>Fig.III.41 2eme capteur détecte la pièce et capteur de couleur détecte La couleur de pièce.....</b>	<b>(70)</b>
<b>Fig.III.42 La fonctionnement de BM quand détectent la couleur de pièces.....</b>	<b>(71)</b>

**Liste des Tableaux :**

**Chapitre 02 : Modélisation d'un bras manipulateur**

**Tableau.II.1.** Caractéristiques techniques du BM..... (26)  
**Tableau.II.2.** Paramètres de DENAVIT- HATENBERG du BM..... (27)  
**Tableau II.3.** Paramètres et valeurs du moteur CC..... (34)

**Chapitre 03 : Conception et réalisation d'un bras manipulateur**

**Tableau III.1.** Synthèse des caractéristiques d'Arduino Mega2560. .... (43)  
**Tableau III. 2.** Paramètres techniques de servomoteur MG90S ..... (44)  
**Tableau III. 3 .** Les fréquences utilisées dans notre projet. .... (53)

**List des Abréviations :**

**ISO :** Organisation internationale de normalisation .

**SMA :** système mécanique articule.

**BM :** bras manipulateur.

**DH :** Denavit-Hartenberg.

**PWM :** Pulse Width Modulation.

**LED :** Light Emithing Diode.

**MCC :** moteur à courant continu.

**3D :** trois dimensions.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## **Introduction générale :**

Regroupant l'électronique, l'électrotechnique, la mécanique, l'automatique et l'informatique, la robotique est devenue depuis les années soixante-dix, une discipline à part entière. Avec les grands progrès qu'elle a connus, la robotique s'impose de plus en plus dans l'industrie moderne. Actuellement, les chercheurs parviennent à concevoir des robots légers et rapides...

Les robots manipulateurs sont les plus utilisés dans les systèmes industriels, car ils sont flexibles permettent d'augmenter la productivité, réduire les coûts de production et améliorer la qualité de la production. Nous retrouvons également ce type de robots dans les hôpitaux où ils assistent l'être humain dans des procédures chirurgicales difficiles ainsi que dans des milieux qui lui sont hostiles, tel que dans des pièces à températures très élevée ou radioactive. Ils ont également fait leur preuve dans des domaines tel que l'agriculture, la Construction, l'exploitation des fond marins ou de l'espace.

Commander un robot manipulateur consiste à lui permettre d'atteindre un état désiré ou de réaliser une tâche bien spécifique avec une grande précision dans un environnement réel.

Le but de notre travail consiste en la conception et la réalisation d'un robot de type bras manipulateur à quatre degrés de liberté en utilisant des servomoteurs et un moteur pas à pas permettant ainsi au bras manipulateur de se déplacer avec une grande précision.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

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

Le deuxième chapitre est consacré à la description et la modélisation du bras manipulateur étudié. La première partie traite de la modélisation et de l'élaboration des modèles géométriques direct et inverse, en utilisant la méthode de Denavit-Hartenberg. Et la méthode de Paul ainsi que de la modélisation des actionneurs électriques. La deuxième partie porte sur la description mécanique du bras manipulateur

Le troisième chapitre est divisé en deux parties dans la première partie nous avons présenté une description de différents softwares et hardware utilisés pour le développement du bras manipulateur et le tapis roulant et dans la deuxième partie nous avons développé notre réalisation pratique et les tests que nous avons choisi pour tester l'efficacité notre bras manipulateur.

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

# **Chapitre 01 :**

# **Généralités sur les**

# **robots**

## **I.1 : Introduction :**

De nos jours, l'utilisation des machines dans l'industrie ou la recherche se développe, le plus important, en particulier l'utilisation de robots. Cela vous permet de manipuler beaucoup de précision et donc de manière plus sûre, différents produits ou choses, neutres ou dangereux.

Dans ce chapitre, nous présenterons un certain nombre de définitions ainsi qu'un résumé Histoire de la robotique. Nous présenterons différents types de robots et leurs composants. Enfin, nous aborderons la classification des systèmes robotiques, avec une courte introduction Parenthèses autour des domaines d'application possibles.

## **I.2 : Définition :**

**I.2.1 : Le robot :** Il s'agit d'un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines comme la manipulation d'objets ou le mouvement, dans le but de se substituer à l'humain pour accomplir certaines tâches physiques, et cette réalisation est quelque peu indépendante selon les facultés de perception de l'environnement dans lequel le robot est doté. [1]

### **I.2.2 : Définition de la robotique**

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

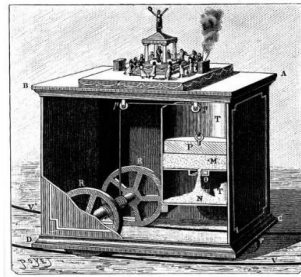
### **I.2.3 : L'histoire de la robotique :**

Depuis la nuit des temps, l'homme a cherché à se faire remplacer pour des tâches spécifiques pouvant être dangereuses, fastidieuses ou longues. Le concept du robot a été établi par de nombreuses réalisations historiques créatives, tel que : l'horloge à l'eau de Clepsydre introduite par les Babyloniens (1400 avant JC), le théâtre de l'automate du Héron d'Alexandrie (une centaine d'années après JC) et les automates de l'arabe Al-Jazari (1200 après JC) [3]. Un de ces spécimens très évolué fut présenté par Jacques de Vaucanson en 1738 : il représentait un homme jouant d'un instrument de musique à vent. Jacques de Vaucanson créa également un automate représentant un canard mangeant et refoulant sa nourriture après ingestion de cette dernière.

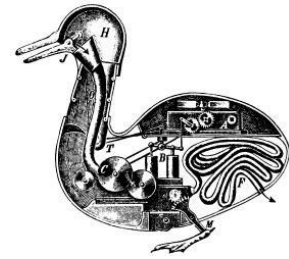
Cependant, l'apparition du robot physique a dû attendre l'arrivée de technologies avancées et plus adaptées au cours du XXe siècle.



(a)



(b)



(c)

**Fig.I.1.** De gauche à droite : (a) Horloge a eau de Clepsydre, (b) Théâtre mobile de Héron D'Alexandrie, (c) Canard digérateur de Jacques de Vaucanson [3].

- 1920 : L'origine du mot robot provient de la langue tchèque dans laquelle son ancêtre "robota" signifie travail forcé. Il a été introduit, en 1920, par l'écrivain tchèque Karel Capek dans la pièce de théâtre « Rossum's Universal Robots » [4].

- En 1954, George Charles Devol invente le premier robot industriel programmable. Il fonde en 1956 la première entreprise de robot, Unimation, avec l'ingénieur Joseph Engelberger. Leur robot, appelé Unimate, était capable de manipuler des objets avec des actionneurs hydrauliques. [4]



**Fig.I.2.** Unimate, premier robot industriel [4]

- En 1969, Victor Scheinman de l'Université de Stanford inventa un bras articulé sur 6 axes. Scheinman vendit son concept à Unimation plus tard [4].

- 1973 : KUKA, une entreprise allemande crée le premier robot industriel avec 6 axes contrôlés électro-mécaniquement : le Famulus [4].

- 1978 : Unimation propose le PUMA, un robot d'assemblage encore utilisé de nos jours

dans plusieurs laboratoires de recherche [4].

- 1981 : Takeo Kanade construit le premier robot muni de moteurs installés directement aux articulations du bras. Cela a permis des robots plus rapides et plus précis qu'auparavant [4].
- 1998 : ABB, Suède, a développé le FlexPicker, le robot de préparation de commandes le plus rapide au monde basé sur le robot delta développé par Raymond Clavel, Institut fédéral de technologie de Lausanne (EPFL) [4].
- 2003 : Première mission d'exploration de la planète Mars impliquant deux robots mobiles, Spirit et Opportunity [4].

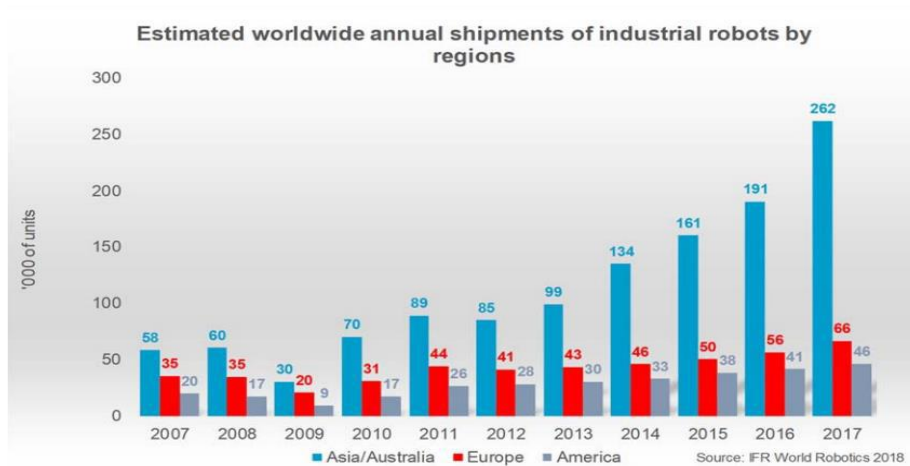


**Fig.I.3.** Opportunity [4]

- 2011 : Robonaut (R2B) premier robot humanoïde envoyé dans l'espace construit et conçu par la NASA au Johnson Space Center (JSC) à Houston (Texas), en collaboration avec General Motors (GM) et Oceaneering [4].



**Fig.I.4.** Robonaut [4]



**Fig.I.5.** Graphique représentant l'estimation des expéditions annuelles mondiales de robots industriels par régions [4].

### I.3 : Types des robots :

Dans le domaine industriel Il existe deux types de robots : robots mobiles et robots manipulateurs :

#### I.3.1 : Robots mobiles :

Ce sont des robots capables de se déplacer dans un environnement, Ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation (les robots explorateurs, les robots de services...) [5].



**Fig.I.6.** Robots mobiles. [5]

### **I.3.2 : Robots manipulateurs :**

C'est des robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise et répétitive. Ce sont des manipulateurs automatiques programmés qui se substituent à l'homme pour l'accomplissement de tâches répétitives, (tels que les bras manipulateur, médicaux, les robots industriels...) [5].



**Fig.I.7.** Robot manipulateur. [5]

### **I.3.3 : Robots industriels :**

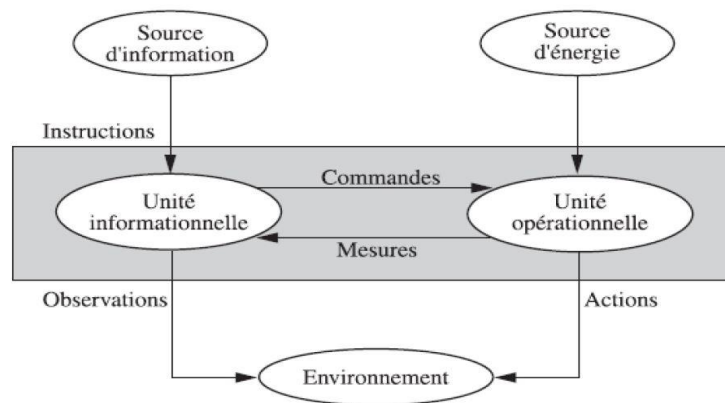
La définition varie selon les pays, nous nous contenterons de la version standard avant Organisation internationale de normalisation (ISO) : "Une machine formée par un mécanisme qui comprend plusieurs degrés de liberté, et a souvent l'apparition d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet capable de porter des outils, Des pièces ou un appareil d'examen » [6].

## **I.4 : Composants d'un système robotique :**

### **I.4.1 : Unité opérationnelle :**

Exerce les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. Cette partie, qui constitue le robot physique, intègre la structure mécanique (segments, articulations, architecture, ...), les modules d'énergie (amplificateurs, variateurs, servovalves...), les convertisseurs d'énergie (moteurs, vérins...), les chaînes cinématiques de transmission mécanique (réducteurs, vis à billes, courroies crantées ...)

Les capteurs de proprioceptifs placés sur chaque axe pour mesurer en permanence leur position et leur vitesse, et enfin l'effecteur, ou organe terminal, qui est en interaction avec l'environnement.[7]



**Fig.I.8.** Structure fonctionnelle d'un robot [7].

#### **I.4.2 : Unité informationnelle :**

Reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras manipulateur et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de ses tâches.

Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanente selon le cycle information-décision-action.[7]

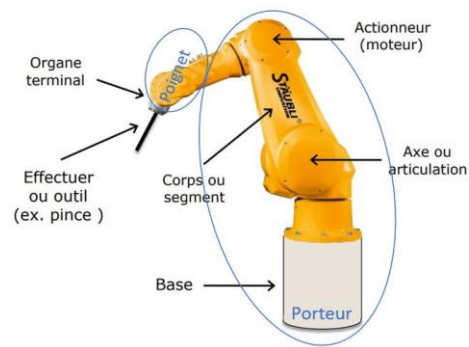
#### **I.5 : Bras manipulateur :**

Un bras manipulateur est un bras d'un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut être utilisé pour effectuer une variété de tâches avec une grande précision. [8]



**Fig.I.7.** Robot manipulateur. [5]

### **I.5.1 : Architecteur d'un bras manipulateur :**



**Fig.I.9.** Architecture d'un robot. [5]

#### **I.5.1.1 : Base :**

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels [9].

#### **I.5.1.2 : Porteur :**

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé (segment, articulation, actionneur, organe terminal), il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation imposée. [9] Il est constitué de :

#### **I.5.1.3 : Segment :**

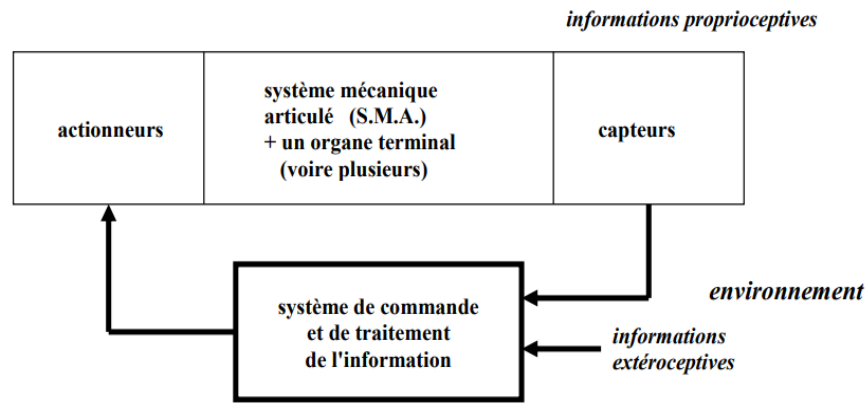
Corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres [9].

#### **I.5.1.4 : Articulation :**

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté, de l'un par rapport à l'autre [9].

### **I.6 : Constituant d'un robot :**

On distingue classiquement 4 parties principales dans un robot manipulateur



**Fig.I.10.** Constituant d'un robot [9]

### **I.6.1 : Les actionneurs**

Les actionneurs sont l'ensemble des moteurs associés à des transmissions (courroies crantées) pour animer le S.M.A.

Ils utilisent souvent des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu et à commande par l'induit (la tension n'est continue qu'en moyenne, car en général l'alimentation est un hacheur de tension à fréquence élevée).

Les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique). Ils doivent agir en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). Il existe également des actionneurs pneumatiques ayant un usage général pour les manipulateurs à cycles.

### **I.6.2 : Le système mécanique articulé (S.M.A.)**

Il s'agit d'un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action.

Le rôle du S.M.A. est de guider l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Il est composé d'une chaîne cinématique de corps, généralement rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés.

#### **I.6.2.1 : Structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple**

C'est une chaîne cinématique dont chaque membre possède un degré de connexion (nombre de liaisons mécaniques) inférieur ou égal à deux. Un robot sériel est formé d'une chaîne cinématique simple dont la base et l'organe effecteur possèdent un degré de connexion

d'un (c'est-à-dire qu'il n'est relié qu'à un seul corps) et les autres éléments un degré de connexion de deux.

### I.6.2.2 : Structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée :

C'est une chaîne cinématique qu'il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne

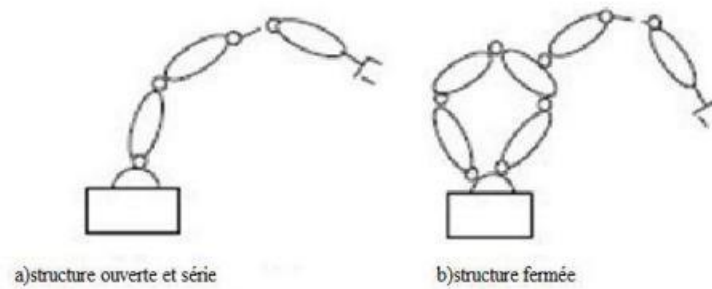


Fig.I.11 : SMA à chaîne cinématique série et fermée [10]

### I.6.3 : Articulation rotoïde :

Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour [11].

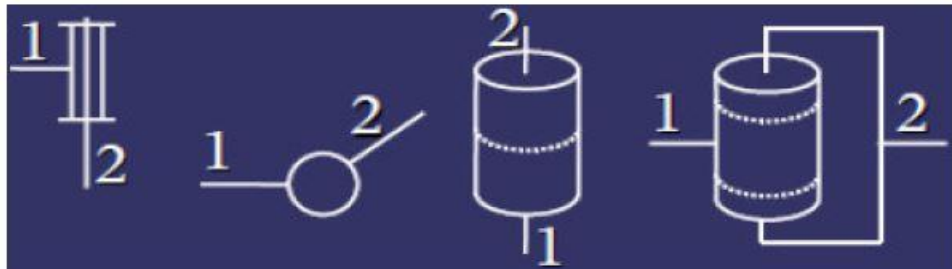
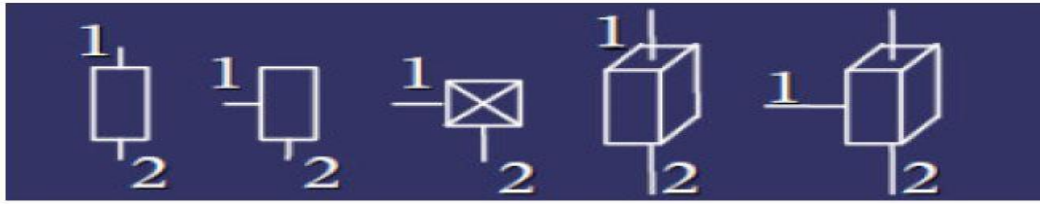


Fig.I.12. Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes [12].

### I.6.4 : Articulation prismatique :

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe [12].



**Fig.I.13.** Représentation d'une articulation prismatique sus ses différentes formes. [12]

### **I.6.5 : Organe terminal :**

On regroupe tous les dispositifs destinés à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement.

Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

### **I.6.6 : Les capteurs :**

Les capteurs sont les organes de perception. Ils sont dits proprioceptifs lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations) et extéroceptifs lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, de contact, mesure de distance, vision artificielle).

### **I.6.7 : La commande :**

La partie commande synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur.

### **I.7 : Classification des robots :**

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

- Point de vue fonctionnel
- Point de vue géométrique

### **I.7.1 : Classification fonctionnelle :**

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

#### **I.7.1.1 : Manipulateur à commande manuelle :**

Cette figure représente les manipulateurs à commande manuelle :



**Fig.I.14.** Manipulateur à commande manuelle. [13]

#### **I.7.1.2 : Manipulateur automatique :**

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

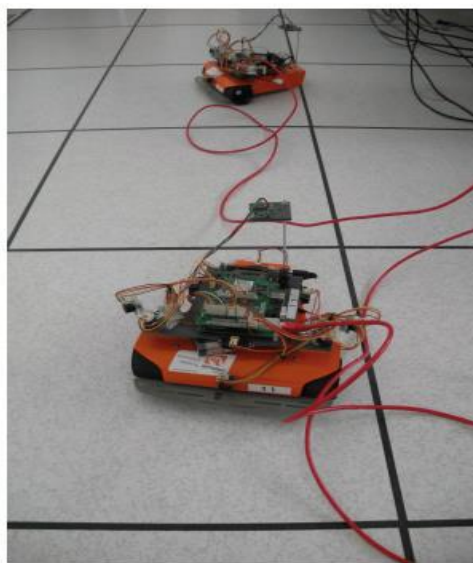


**Fig.I.15.** Manipulateur automatique. [14]

### **I.7.1.3 : Robots programmables :**

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

Pour certains robots, par exemple les robots de peinture, qui doivent suivre une trajectoire complexe et difficile d'être exprimée mathématiquement, un opérateur humain spécialiste de la tâche effectue la trajectoire en guidant le bras du robot à l'aide d'un « pantin », et l'entièreté de la trajectoire est mémorisée par le robot [15].



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

### **I.7.1.4 : Robots intelligents :**

On trouve actuellement des robots de seconde génération qui sont capables d'acquiescer et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs d'efforts, ...). On étudie des robots de troisième génération, capables de comprendre un langage oral proche du langage naturel et de se débrouiller de façon autonome dans un environnement complexe, grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle.



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

## **I.7.2 : Classification géométrique**

Il existe différentes architectures du porteur : la structure cartésienne (PPP), la structure cylindrique (RPP ou PRP), la structure sphérique ou polaire (RRP), la structure dite SCARA (RRP) et enfin la structure anthropomorphe (RRR).

### **I.7.2.1 : Structure cartésienne (PPP) :**

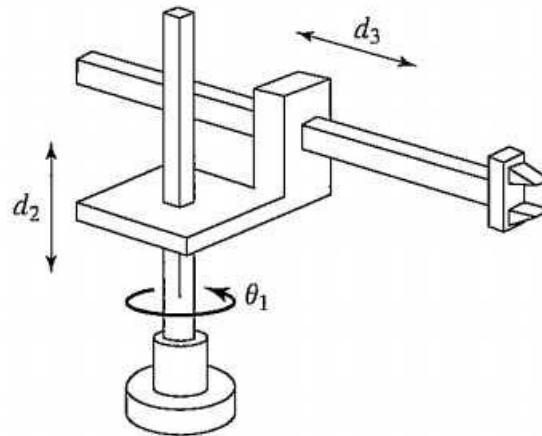
Trois liaisons prismatiques, est la plus ancienne historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure est relativement peu utilisée, sauf dans quelques applications particulières : robots pratiques, robots de magasinage, par exemple [18].



**Fig. I.18.** Structure d'un Robot cartésien. [9]

### **I.7.2.2 : La structure cylindrique (RPP) ou (PRP)**

Les caractéristiques d'une structure cylindrique (RPP ou PRP) sont : trois axes non perpendiculaires en série avec trois degrés de liberté et une grande rapidité. Le volume de travail est un cylindre plein ou creux, autrement dit un tore à section rectangulaire, dont la hauteur  $L$  est la translation permise par une liaison prismatique.[19]



**Fig.1.19.** Structure RPP [20]

### I.7.2.3 : Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale : (RRP)

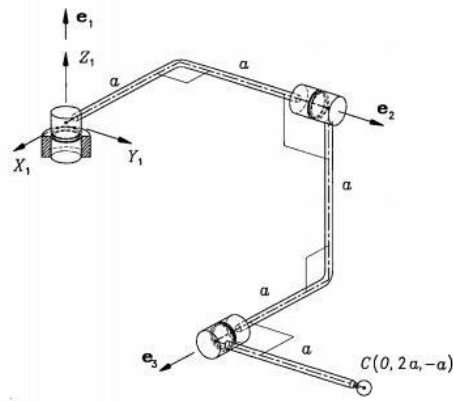
Est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structure cylindrique [21].



**Fig.I.20.** Structure d'un robot sphérique. [9]

### I.7.2.4 : La structure dite SCARA

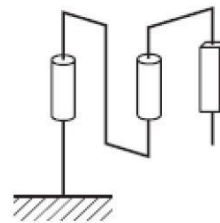
Les caractéristiques d'une structure SCARA (Sélective Compliance Articulated Robot for Assemblage) sont : 3 axes en série cylindrique (RRP) ayant trois degrés de liberté. Les particularités de cette structure sont qu'elles sont précises et très rapides [21].



**Fig.1.21.** Structure RRR [22]

### I.7.2.5 : Structure dite SCARA :

A axes de rotation parallèles est l'une des plus utilisées, en particulier pour des tâches de manutention ou d'assemblages très fréquents dans l'industrie. Ce succès commercial est lié au fait que le ratio entre le volume de travail et l'encombrement est très favorable et aussi que la structure SCARA est très adaptée à ce type de tâches [23].



**Fig.I.22.** Structure d'un robot SCARA. [24]

### I.8 : Domaines d'application :

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

#### I.8.1 : Tâches simples :

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

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

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

### **I.8.2 : Tâches complexes :**

Robotique de service :

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

### **I.9 : Avantages & Inconvénients des robots :**

#### **I.9.1 : Avantages :**

- Augmentation des taux de production.
- Amélioration de la qualité du produit.
- Réduction du gaspillage de matériel.
- Réduction des accidents.
- Faible taux d'emploi (réduite de la main-d'œuvre).
- Plus grande flexibilité et programmabilité (d'évolutivité).

#### **I.9.2 : Inconvénients :**

- Remplacement du travail humain.
- Les robots représentent un coût initial coûteux.
- Ne peut faire que ce qui lui est demandé ; ni plus ni moins.
- Plus grand chômage

## **I.10 : Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la robotique. Nous avons présenté, également, une description sur le domaine de la robotique en mettant l'accent sur les domaines applicatifs des robots industriels, l'historique des robots, l'architecture mécanique générale des bras manipulateurs, leurs structures, leurs utilisations, leurs différents types, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'application ce qui va nous servir pour la contactations de notre bras.

**Chapitre 02 :**  
**Modélisation d'un**  
**bras manipulateur**

## II.1 : Introduction :

Dans tout système en robotique la mécanique et l'électronique sont liées, ceci se matérialise par l'étude des actionneurs des chaînes cinématiques associées et aussi par l'étude des capteurs qui constituent la source d'information. L'objectif de notre travail est de réalisation et conception un bras manipulateur à quatre degrés de liberté en utilisant une carte Arduino Méga.

Dans ce chapitre, on va d'abord décrire la partie mécanique de notre bras manipulateur, puis on va passer à la modélisation, qui consiste à représenter les aspects importants d'un système en décrivant les relations entre ses différentes grandeurs par des relations mathématiques.

## II.2 : Modélisation d'un bras manipulateur :

### II.2.1 : Présentation du bras manipulateur :

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

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

### II.2.2 : Notion de position :

Pour exprimer les notions de repos et de mouvement par rapport à un référentiel, considérons un repère orthonormé  $\mathcal{R}(x,y,z)$  dans lequel est repérée la position M (x, y, z) d'un corps. Le corps est au repos par rapport à ce repère si ses coordonnées sont constantes au cours du temps. Cependant, si au moins l'une d'elles varie, le corps est en mouvement par rapport à  $\mathcal{R}$  [25].

Il existe plusieurs types de coordonnées pour repérer la position :

### II.2.3 : Coordonnées cartésiennes :

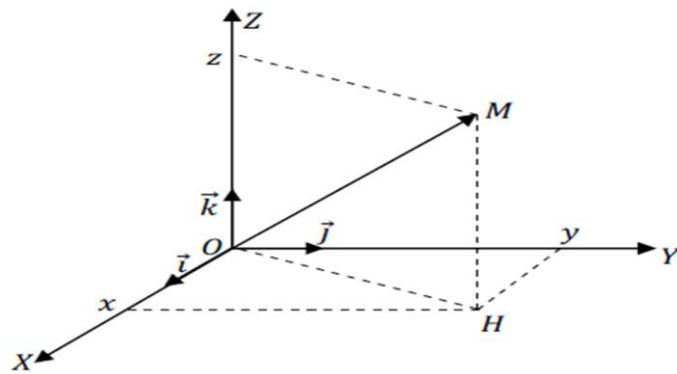
C'est le référentiel le plus utilisé en robotique, car il est plus simple dans le cas de la mesure de la distance.

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

$$\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \quad (\text{II.01})$$

Où (x, y, z) sont les composantes du vecteur  $\vec{OM}$  dans la base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ ,

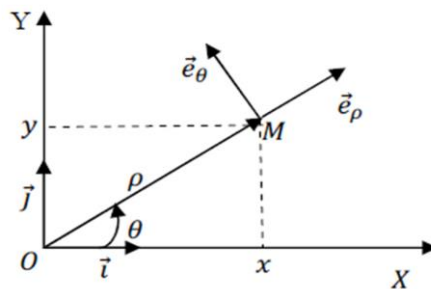
x : abscisse de M ; y : ordonnée de M ; z : cote de M. [25]



**Fig.II.1.** Coordonnées cartésiennes. [25]

### II.2.4 : Coordonnées polaires :

Un point est repéré par ses coordonnées  $(\rho, \theta)$  dites cylindrique [25], illustrées sur la figure suivante :



**Fig.II.2.** Coordonnées polaires. [25]

Les coordonnées polaires sont liées aux coordonnées cartésiennes par les relations suivantes [25] :

$$\begin{cases} X = \rho \cos(\theta) \\ Y = \rho \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{II.02})$$

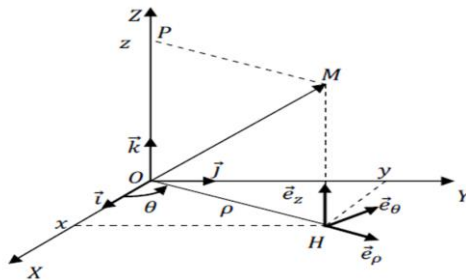
Et inversement

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \text{atang}\left(\frac{x}{y}\right) \end{cases} \quad (\text{II.03})$$

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

### II.2.5 : Coordonnées cylindriques :

Un point est repéré par ses coordonnées  $(\rho, \theta, z)$  dites cylindrique [30], illustrées sur la figure suivante :



**Fig. II. 3.** Système de coordonnées cylindriques. [25]

Les coordonnées cylindriques sont liées aux coordonnées cartésiennes par les relations suivantes [25] :

$$\begin{cases} X = \rho \cos (\theta) \\ Y = \rho \sin (\theta) \\ Z = z \end{cases} \quad (\text{II.04})$$

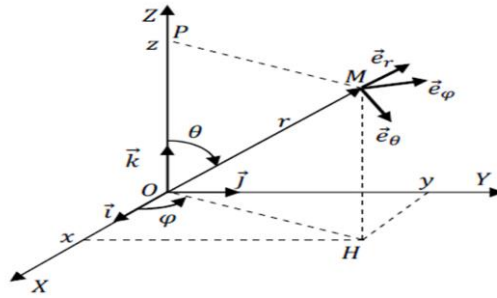
Et inversement :

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \text{atang}\left(\frac{x}{y}\right) \\ Z = z \end{cases} \quad (\text{II.05})$$

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

### II.2.6 : Coordonnées sphériques :

Un point est repéré par ses coordonnées  $(r, \theta, \phi)$  dites sphérique [25], illustrées sur la figure suivante :



**Fig.II.4.** Système de coordonnées sphérique. [25]

Le passage entre coordonnées sphérique et cartésiennes se fait comme suit : [25]

$$\begin{cases} x = r \sin(\theta) \cos(\phi) \\ y = r \sin(\theta) \sin(\phi) \\ z = r \cos(\theta) \end{cases} \quad (\text{II. 06})$$

Et inversement :

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \\ \phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 07})$$

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

### II.2.7 : Coordonnées homogènes :

Un point est représenté par  $P_X$ ,  $P_Y$ ,  $P_Z$  coordonnées cartésiennes [26] :

$$P = \begin{pmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II. 08})$$

### II.2.8 : Transformation homogène :

La notion de transformation de repère est donc fondamentale, elle permet :

- Ø D'exprimer les situations des différents corps du robot les uns par rapport aux autres.
- Ø De spécifier les situations que doit prendre le repère associé à l'organe terminal
- Ø De décrire et de contrôler les efforts mis en jeu lorsque le robot interagit avec son environnement. [26]

### II.2.8.1 : Transformations homogènes des repères :

On définit la matrice de transformation homogène par

$${}^i_jT = \begin{bmatrix} {}^i_j s & {}^i_j n & {}^i_j a & {}^i_j p \\ s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.09})$$

${}^i_j s$ ,  ${}^i_j n$ , et  ${}^i_j a$  représentent les vecteurs unitaires des axes  $X_j$ ,  $Y_j$  et  $Z_j$  du repère  $R_j$ , exprimé dans  $R_i$ ,  ${}^i_j p$  est un vecteur exprimant l'origine du repère  $R_j$  dans le repère  $R_i$

On dit également que la matrice  ${}^i_jT$  définit le repère  $R_j$  dans le repère  $R_i$ , comme on peut noter la matrice de transformation sous forme partitionnée :

$${}^i_jT = \begin{bmatrix} 0 & {}^i_j A & 0 & {}^i_j P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i_j s & {}^i_j n & {}^i_j a & {}^i_j p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La matrice A représente la matrice de rotation ou d'orientation du repère  $R_i$  par rapport à  $R_j$

La colonne P représente la translation du repère  $R_i$  par rapport à  $R_j$

Dans le cas d'une translation pure  $A = I_3$ , tel que I est la matrice unité. [26]

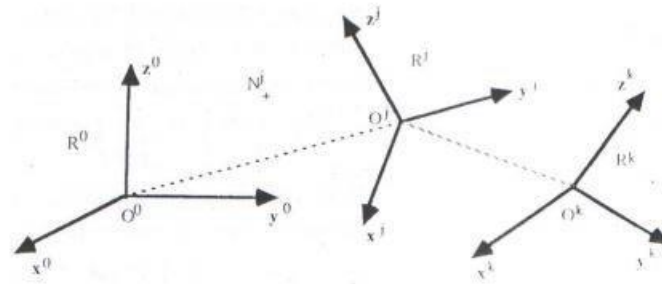


Fig.II.5. Transformation des repères [26]

### II.2.8.2 : Matrice de translation pure homogène :

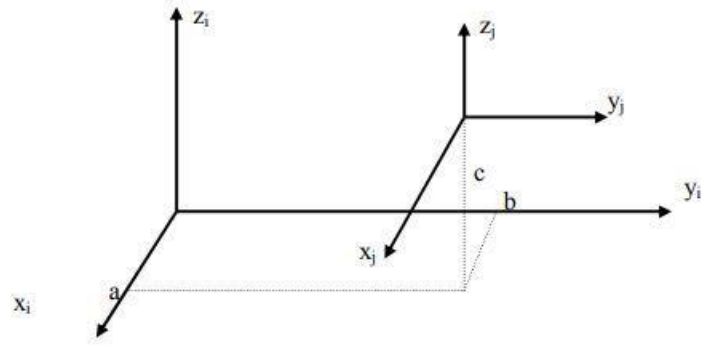
Soit  $Tr(a,b,c)$  une transformation qui désigne la translation  $a$ ,  $b$ , et  $c$  le long des axes  $x$ ,  $y$ , et  $z$  respectivement.

La transformation dans ce cas s'exprime par :

$${}^i_jT = Tr(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Propriétés :

- $Tr(a,b,c) = Tr(x,a) Tr(y,b) Tr(z,c)$
- L'ordre des multiplications étant quelconque. [26]



**Fig.II.6.** Transformation de translation pure [26]

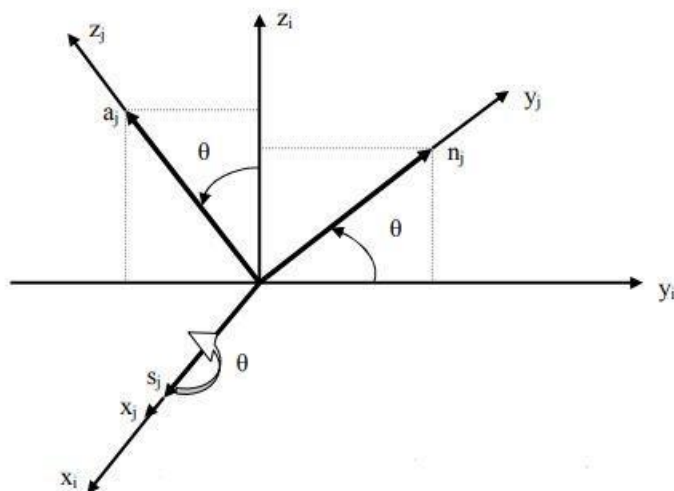
### II.2.8.3 : Matrice de rotation homogène :

On définit  $\text{Rot}(x, \theta)$ ,  $\text{Rot}(y, \theta)$ ,  $\text{Rot}(z, \theta)$  la transformation homogène qui s'exprime par :

$$\bullet \quad {}^i_j T = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Rotation autour de X.} \quad (\text{II.12})$$

$$\bullet \quad {}^i_j T = \text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Rotation autour de Y.} \quad (\text{II.13})$$

$$\bullet \quad {}^i_j T = \text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Rotation autour de Z.} \quad (\text{II.14})$$



**Fig.II.7.** (exemple de rotation )Transformation de rotation pure autour de l'axe x [26].

## II. 2.9 : Modèle Géométrique

### II. 2.9.1 : Modèle Géométrique direct :

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

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

$$X = f(q) \quad (\text{II. 15})$$

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

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

$$T_{0,\eta} = T_{0,1}(q_1) \times T_{0,2}(q_2) \times \dots \times T_{j-1,j}(q_j) \quad (\text{II. 16})$$

La matrice  $T_{0,\eta}$  représente la position et l'orientation, elle est exprimée dans le repère de référence  $R_0$  de l'organe terminal (effecteur) du robot [27].

### II.2.9.2 : Paramètre de DENAVIT- HARTENBERG (D-H) :

D-H est la convention utilisée pour choisir le système de référence en robotique. Elle fut introduite par Jacques DENAVIT et Richards HARTENBERG [27] [28].

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

1/  $\alpha_j$  : angle entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  correspondant à une rotation autour de  $X_{j-1}$

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

3/  $\theta_j$  : angle entre l'axe  $X_{j-1}$  et  $X_j$  correspondant à une rotation autour de  $Z_j$  .

4/  $r_j$  : distance entre  $X_{j-1}$  et  $X_j$  le long de  $Z_j$  .

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

$${}^{j-1}_j T = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & d_j \\ c\alpha_j s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & s\alpha_j & -r_j s\alpha_j \\ s\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j c\theta_j & c\alpha_j & r_j c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

Le bras manipulateur doit suivre une trajectoire précise lors du déplacement d'un objet à un endroit disgn par les coordonnées X, Y, et Z. Cette tache nécessite l'utilisation du modèle géométrique direct. Pour notre cas le modèle cinématique et le modèle dynamique ne sont pas nécessaires puisque la vitesse et le temps d'exécution de la tâche ne sont pas Importantes [27] [28].

### II.2.9.3 : Modélisation du bras manipulateur réalisé :

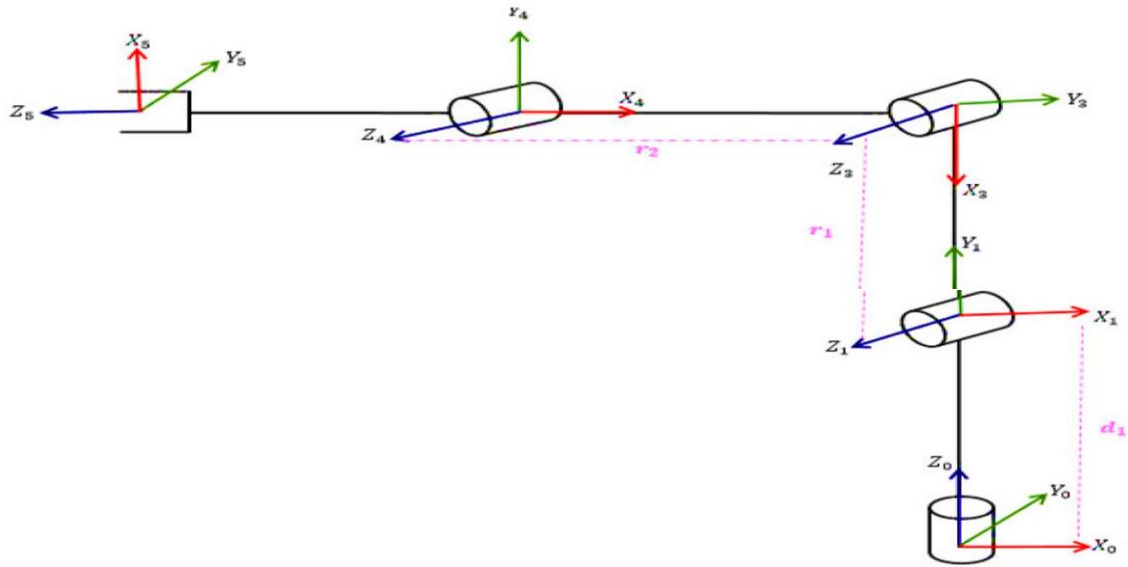
Le bras manipulateur (BM réalisé) est constitué de deux sous-ensembles distincts : un organe terminal et une structure mécanique articulée. Le rôle de cette dernière est d'amener l'organe terminal a une situation (position et orientation) donnée. Son architecture est une chaine cinématique ouverte simple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

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

**Tableau.II.1.** Caractéristiques techniques du BM.

Caractéristiques techniques du bras manipulateur	
Nombre d'articulation	4
Actionneur	Moteur pas a pas et Servo-moteur
Rotations	
La base	360°
L'épaule	180°
Le coude	180°
Le poignet	180°

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



**Fig.II.8.** Placement des repères et notation du bras manipulateur. [28]

#### II.2.9.4. Identification des paramètres de DH de BM1 réalisé :

**Tableau.II.2.** Paramètres de DENAVIT- HATENBERG du BM1. [27] [28]

Segment	$\theta_j$	$d_j$	$\alpha_j$	$r_j$
<b>1</b>	$\theta_1$	$d_1$	$\pi/2$	$0$
<b>2</b>	$\theta_2$	$0$	$0$	$r_1$
<b>3</b>	$\theta_3$	$0$	$0$	$r_2$
<b>4</b>	$\theta_4$	$0$	$-\pi/2$	$0$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & d_1 \\ C_{\alpha_1} S_{\theta_1} & C_{\alpha_1} S_{\theta_1} & -S_{\alpha_1} & -r_1 S_{\alpha_1} \\ S_{\alpha_1} S_{\theta_1} & S_{\alpha_1} C_{\theta_1} & C_{\alpha_1} & r_1 C_{\alpha_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & -S_{\theta_2} & 0 & d_2 \\ C_{\alpha_2} S_{\theta_2} & C_{\alpha_2} S_{\theta_2} & -S_{\alpha_2} & -r_2 S_{\alpha_2} \\ S_{\alpha_2} S_{\theta_2} & S_{\alpha_2} C_{\theta_2} & C_{\alpha_2} & r_2 C_{\alpha_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & -S_{\theta_2} & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{\theta_2} & C_{\theta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_3} & -S_{\theta_3} & 0 & d_3 \\ C_{\alpha_3} S_{\theta_3} & C_{\alpha_3} S_{\theta_3} & -S_{\alpha_3} & -r_3 S_{\alpha_3} \\ S_{\alpha_3} S_{\theta_3} & S_{\alpha_3} C_{\theta_3} & C_{\alpha_3} & r_3 C_{\alpha_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_3} & -S_{\theta_3} & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{\theta_3} & C_{\theta_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & d_4 \\ C_{\alpha_4} S_{\theta_4} & C_{\alpha_4} S_{\theta_4} & -S_{\alpha_4} & -r_4 S_{\alpha_4} \\ S_{\alpha_4} S_{\theta_4} & S_{\alpha_4} C_{\theta_4} & C_{\alpha_4} & r_4 C_{\alpha_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 21})$$

La matrice de transformation homogène du repère  $R_0$  jusqu'au repère  $R_4$  s'obtient par la multiplication successive des matrices du passage précédent [27] [28] :

$$T_4^0 = {}^0T(q_1) \times {}^1T(q_2) \times {}^2T(q_3) \times {}^3T(q_4) \quad (\text{II. 22})$$

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} X_{4x} & Y_{4x} & Z_{4x} & P_{4x} \\ X_{4y} & Y_{4y} & Z_{4y} & P_{4y} \\ X_{4z} & Y_{4z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

Par identification avec les éléments de la matrice du passage homogène obtenu par les coordonnées opérationnelles et avec la convention [27] [28] :

$$C(\theta_i) = \cos(\theta_i) \text{ et } S(\theta_i) = \sin(\theta_i) \quad (\text{II. 24})$$

On obtient :

1<sup>ère</sup> colonne :

$$X_{4x} = C\theta_4 [C\theta_3 (C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) - S\theta_3 (C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2)] \quad (\text{II. 25})$$

$$X_{4y} = S\theta_4 \quad (\text{II. 26})$$

$$X_{4z} = -C\theta_4 [C\theta_3 (S\theta_1 C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + S\theta_3 (S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)] \quad (\text{II. 27})$$

2<sup>ème</sup> Colonne :

$$Y_{4x} = -S\theta_4 [C\theta_3 (C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + S\theta_3 (C\theta_1 S\theta_2 + S\theta_1 C\theta_2)] \quad (\text{II. 28})$$

$$Y_{4y} = C\theta_4 \quad (\text{II. 29})$$

$$Y_{4z} = -S\theta_4 [-S\theta_3 (S\theta_1 C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3 (S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2)] \quad (\text{II. 30})$$

3<sup>ème</sup> Colonne :

$$Z_{4x} = -S\theta_3 (C\theta_1 C\theta_2 - S\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3 (-C\theta_1 S\theta_2 - S\theta_1 C\theta_2) \quad (\text{II. 31})$$

$$Z_{4y} = 0 \quad (\text{II. 32})$$

$$Z_{4z} = -S\theta_3 (S\theta_1 C\theta_2 - C\theta_1 S\theta_2) + C\theta_3 (S\theta_1 S\theta_2 + C\theta_1 C\theta_2) \quad (\text{II. 33})$$

4<sup>ème</sup> colonne :

$$P_{4X} = 0 \quad (\text{II. 34})$$

$$P_{4Y} = -r_3 - r_2 \quad (\text{II. 35})$$

$$P_{4z} = 0 \quad (II. 36)$$

$$\text{On se pose } C_i = \text{Cos}(\theta_i) \text{ et } S_i = \text{Sin}(\theta_i) \quad (II. 37)$$

Alor

(II. 38)

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} C_4[C_3(C_1C_2 - S_1S_2) - S_3(C_1S_2 + S_1C_2)] & -S_4[C_3(C_1C_2 - S_1S_2) + S_3(C_1S_2 + S_1C_2)] & -S_3(C_1C_2 - S_1S_2) + C_3(-C_1S_2 - S_1C_2) & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & -r_3 - r_2 \\ -C_4[C_3(S_1C_2 - C_1S_2) + S_3(S_1S_2 + C_1C_2)] & -S_4[-S_3(S_1C_2 - C_1S_2) + C_3(S_1S_2 + C_1C_2)] & -S_3(S_1C_2 - C_1S_2) + C_3(S_1S_2 + C_1C_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### II.2.9.5 : Le modèle géométrique inverse (MGI) [12]

On a vu que le modèle géométrique direct d'un robot a permis de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires. Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal.

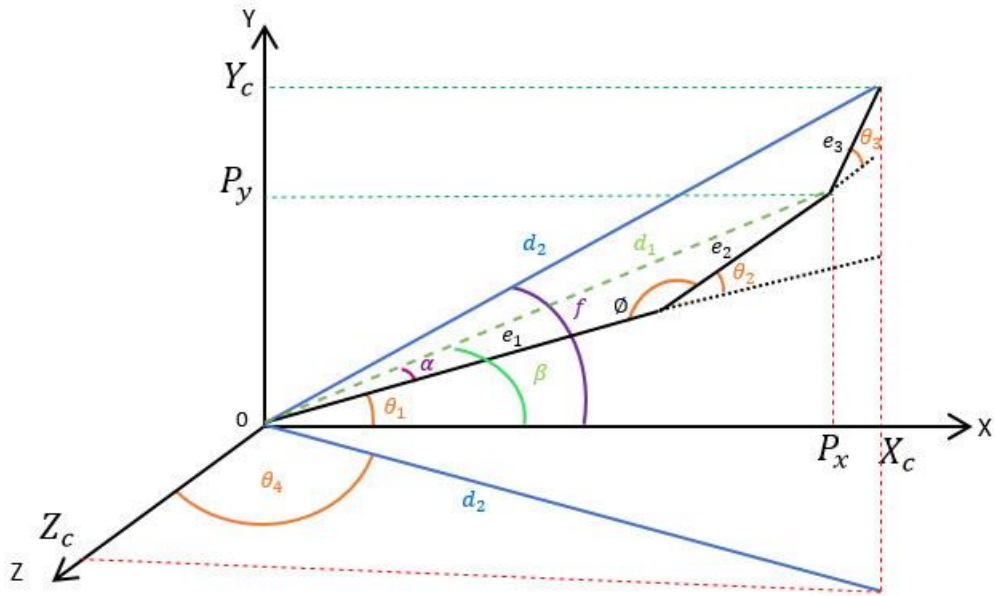
Le modelé géométrique inverse permet de calculer la position de chaque liaison du robot en fonction de la position et de l'orientation de l'organe terminale [12].

Celle-ci s'obtient à l'aide de l'équation suivante :

$$q = f^{-1}(x) \quad (II. 39)$$

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

Une démarche analytique simple permet de déterminer le modèle géométrique inverse du BM :



**Fig.II.9.** Les vecteurs des variables articulaires.[12]

Avec :

$$\cos(\varphi) = \frac{P_x^2 + P_y^2 - e_1^2 - e_2^2}{2e_1e_2} \quad (\text{II. 40})$$

$$\sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} \quad (\text{II. 41})$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} \right) \quad (\text{II. 42})$$

$$\theta_2 = (180 - \varphi) \quad (\text{II. 43})$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{P_y}{P_x} \right) \quad (\text{II. 44})$$

$$\alpha = \frac{(e_1 + e_2 \cos(\theta_2))}{e_2 \sin(\theta_2)} \quad (\text{II. 45})$$

$$\theta_1 = \beta - \alpha \quad (\text{II. 46})$$

$$f = \tan^{-1} \left( \frac{Y_c}{X_c} \right) \quad (\text{II. 47})$$

$$\theta_3 = f - \theta_2 - \theta_1 \quad (\text{II. 48})$$

$$d_2 = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \quad (\text{II. 49})$$

$$\theta_4 = \cos^{-1}(Z_c/d_2) \quad (\text{II. 50})$$

### II.3 : Modélisation du moteur électrique à courant continu :

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

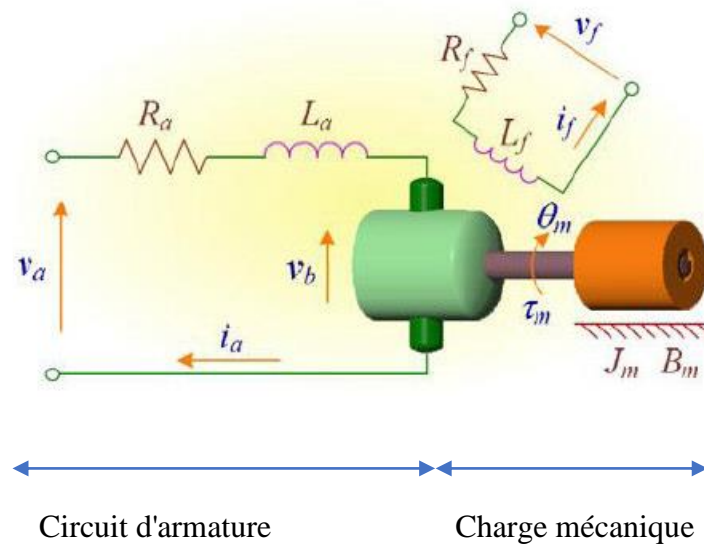


Fig.II.10. Représentation schématique du moteur CC [29].

#### II .3.1 : Les équations électromécaniques :

##### Equation électrique :

$$U(t) = R_a \cdot I_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E(t) \quad (\text{II. 51})$$

L'équation (II. 52) illustre la relation entre force électromotrice produite et la vitesse de l'arbre :

$$V_a(t) = K_a \Phi W_m(t) \quad (\text{II. 52})$$

$V_a$  : Designe la force électromotrice arrière.

$W_m$  : vitesse de l'arbre du moteur.

### Equation mécanique :

$$\tau_m(t) = J_m \frac{dw_m}{dt} + C_r(t) + B_m W_m(t) \quad (\text{II. 53})$$

L'équation (II. 54) indique la relation entre le couple actuel et développe :

$$\tau_m(t) = K_m \phi i_a(t) \quad (\text{II. 54})$$

Où :

$\tau_m(t)$  : Est le couple du moteur produit par l'arbre du moteur

$\phi$  : Le flux magnetique

$i_a(t)$  : Le courant de l'armature

$K_m$  : est la constante de couple moteur

### II .3 .2 : Modèle d'état du moteur

En l'absence du couple résistant ( $C_r(t) = 0$ ) et en considérant la vitesse angulaire De l'arbre de moteur comme sortie, puis en remplaçant l'équation (II.54) dans l'équation (II.53) et l'équation (II.52) dans l'équation (II.51) on obtient :

$$\frac{dw_m(t)}{dt} = -\frac{B_m}{J_m} W_m + \frac{k_m}{J_m} i_a(t) \quad (\text{II. 55})$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{k_a}{L_a} W_m(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) + \frac{1}{L_a} v_a(t) \quad (\text{II. 56})$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = w_m(t) \quad (\text{II. 57})$$

Ces équations, écrites sous la forme matricielle, permettent d'obtenir le modèle d'état de la machine, il est donne par :

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{II. 58})$$

$$Y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (\text{II. 59})$$

Pour résoudre la fonction de transfert du moteur à courant continu en utilisant l'espace D'état : on affecte d'abord les variables :

$$\begin{cases} x_1 = i_a(t) \\ x_2 = \theta(t) \\ x_3 = W_m(t) \end{cases} \quad (\text{II. 60})$$

Deuxièmement, on prend la première dérivée de la précédente équation du système :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{di_a(t)}{dt} \\ \dot{x}_2 = \frac{d\theta(t)}{dt} \\ \dot{x}_3 = \frac{dw_m(t)}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 61})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & -\frac{K_a}{L_a} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_a(t) \quad (\text{II. 62})$$

L'équation de sortie est :

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 63})$$

Le servomoteur est modélisé en circuit avec résistance et inductance connectées en série. La tension d'entrée  $v_l (=)$  est la tension fournie par l'amplificateur pour déplacer le moteur. La tension force électromoteur arrière est induite par la rotation des enroulements d'induit dans le champ magnétique fixe.

Pour dériver la fonction de transfert du moteur à courant continu, le système est divisé en trois composantes principales de l'équation : équation électrique, équation mécanique et électromécanique.

L'équation (II.64) donne la fonction de transfert de la vitesse du moteur :

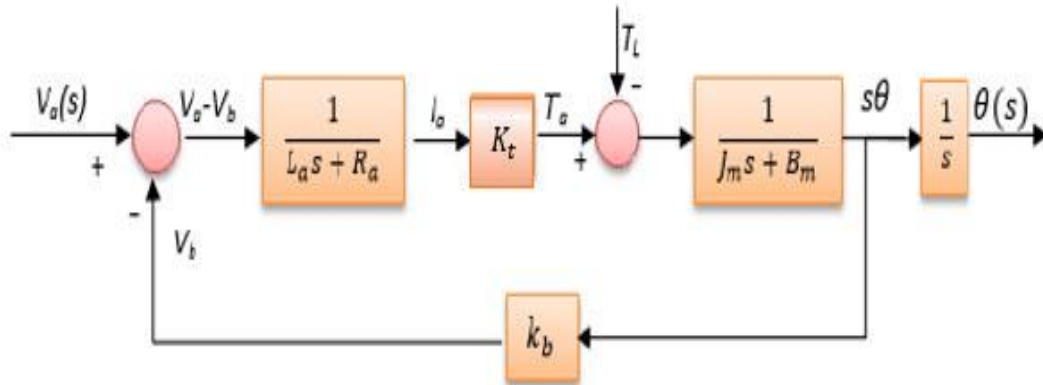
$$G_{\text{vitesse}}(s) = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{k_t}{J_m L_a s^2 + (L_a B_m + R_a J_a) s + k_t k_b} \quad (\text{II. 64})$$

En outre, la fonction de transfert de la position du moteur est déterminée en multipliant la fonction de transfert de la vitesse du moteur par le terme  $\frac{1}{s}$  :

$$G_{\text{position}}(s) = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{k_t}{s [J_m L_a s^2 + (L_a B_m + R_a J_a) s + k_t k_b]} \quad (\text{II. 65})$$

$J_m$  et  $B_m$  sont respectivement le moment d'inertie et le coefficient de frottement du moteur.

Le schéma fonctionnel du moteur CC est illustré dans la figure (II.11), avec la valeur nulle de couple de charge  $T_L$ [30].



**Fig.II.11.** Schéma fonctionnel du moteur CC.[30]

**Tableau II.3.** Paramètres et valeurs du moteur CC.

Paramètres	Nomenclature	Valeurs
Moment d'inertie	$J_m$	0,000052 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de friction	$B_m$	0,01 N.ms
Force électromoteur arrière Constant	$k_b$	0,235 V/radS <sup>-1</sup>
Constante de couple	$k_t$	0,235 Nm/A
Resistance électrique	$R_a$	2 ohms
Inductance électrique	$L_a$	0.23 H

En incluant les paramètres, nous pouvons obtenir la fonction de transfert du moteur DC pour la position de contrôle [31].

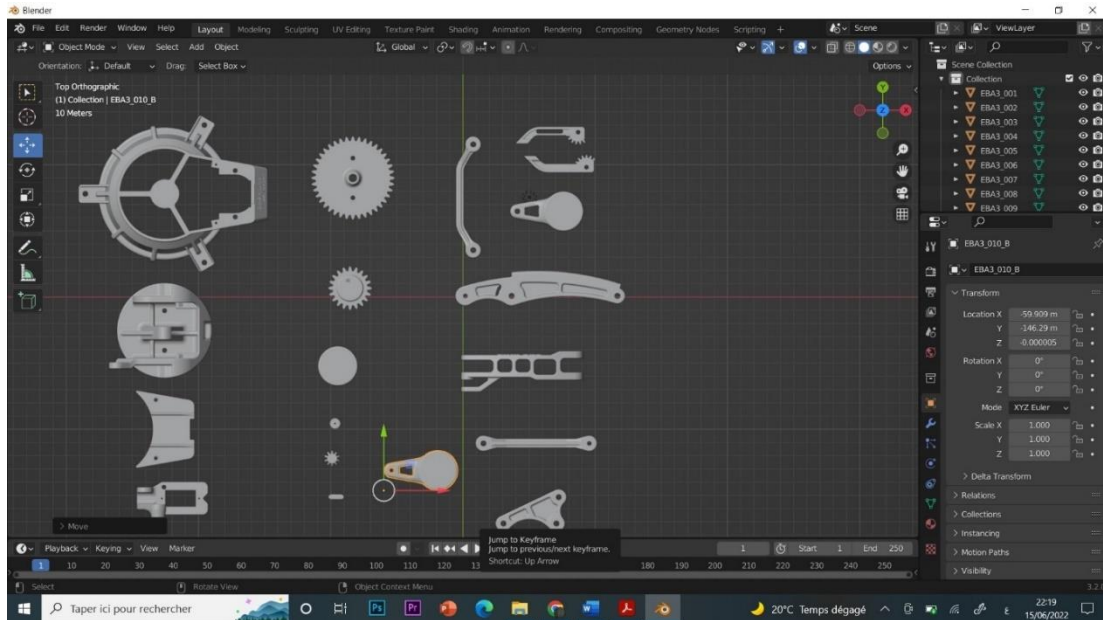
$$G_{\text{position}(s)} = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{19640}{s^3 + 201s^2 + 6290s} \quad (\text{II. 66})$$

## II.4. Description de la partie mécanique du bras manipulateur :

### II.4.1. Structure mécanique du bras :

La réalisation du BM a débuté par la conception de la structure des pièces mécaniques constituant le bras réalisé sur le logiciel Blender. Après on a passé à la réalisation mécanique réelle.

Pour réaliser le BM nous avons opté à utiliser le plexiglass. Le choix de ce matériau a été basé sur sa légèreté, sa disponibilité et son cout raisonnable. La figure ci-dessous montre les pièces de la structure mécanique du bras manipulateur sous le logiciel Blender 3D :



**Fig.II.12.** Les pièces du bras manipulateur sous Blender 3D.

On a utilisé deux servomoteurs et un moteur pas a pas pour la commande des articulations et un servomoteur pour l'ouverture et la fermeture de la pince (pour plus de détails voire chapitre 3). Les cinq parties importantes formant le bras sont les suivantes :

#### **II.4.1.1. La base :**

La base est le socle fixe du bras, elle contient un servomoteur qui permet la rotation du bras de  $0^{\circ}$  à  $360^{\circ}$ . Lorsque nous avons assemblé tout le bras, nous avons remarqué une légère inclinaison de la base à cause du poids exercé sur elle. Comme le montre la figure suivante :



### **Fig.II.13.** Base du BM1.

#### **II.4.1.2 : Arrière-bras :**

Elle est liée à la base à travers la deuxième articulation (servomoteur), qui permet la rotation de  $0^{\circ}$  à  $180^{\circ}$

#### **II.4.1.3 : Avant-bras :**

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

#### **II.4.1.4 : Poignet :**

Il se lie au coude par la quatrième articulation, qui permet la de  $0^{\circ}$  à  $180^{\circ}$ .

A fig.II.14 représente les trois constituants décrits ci-dessus.



**Fig.II.14.** L'épaule, le coude et le poignet du BM1.

#### **II.4.1.5 : La pince :**

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



**Fig.II.15.** Pince du BM1.

#### **II.4.2 : Le bras manipulateur assemblé**

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



**Fig.II.16.** BM assemble.

### II.4.3 : Les organes constitutifs d'un bras manipulateur

Pour que le bras manipulateur puisse exécuter une tâche il a besoin d'actionneur et de transmetteur, ces derniers servent à transmettre de l'énergie des actionneurs aux articulations rotoïde. De plus pour asservir ces actionneurs on a besoin aussi des capteurs [31].

#### II.4.3.1 : Actionneurs :

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

Les trois actionneurs les plus utilisés sont les actionneurs hydrauliques surtout pour les grands robots qui peuvent soulever plusieurs dizaines de kilogrammes, les moteurs électriques souvent utilisés et les actionneurs pneumatiques qui n'exigent pas d'asservissements (robot à mouvement séquentiels). Dans notre projet nous avons utilisé les actionneurs électriques (Servomoteurs et Moteur pas à pas) [32].

#### II.4.3.2 : Transmission entre articulations (engrenages) :

Il est rare que la sortie d'un actionneur soit directement utilisée pour produire un mouvement. Un moteur à courant continu tourne normalement à des vitesses de l'ordre de plusieurs milliers de tours par minute et produit un couple très faible. Afin de diminuer cette vitesse de rotation tout en augmentant significativement le couple disponible, on place entre l'axe moteur et l'axe articulaire un réducteur. La transmission entre les articulations de notre bras manipulateur est assurée par un système d'engrenage illustre dans la figure suivante [33].

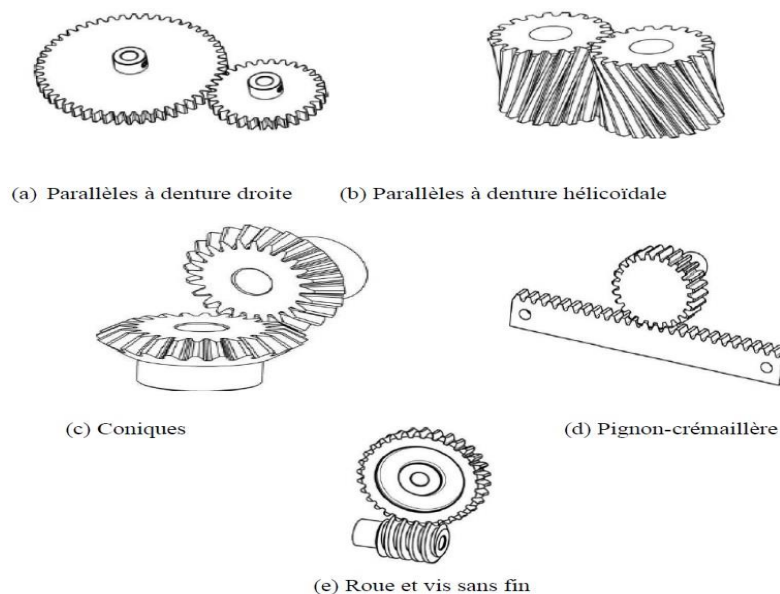


Fig.II.17. Différents types d'engrenage. [33]

### **II.4.3.3 : Les capteurs :**

Ce sont des outils de perception qui permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement. Il existe deux types de capteurs : les capteurs proprioceptifs qui mesurent l'état mécanique interne du robot (comme les capteurs de position, de vitesse ou d'accélération) et les capteurs extéroceptifs qui recueillent des informations sur l'environnement (comme la détection de présence, la mesure de distance...etc.). Les capteurs ont comme fonction de lire les variables relatives au mouvement du robot pour permettre un contrôle convenable [31].

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

### **II.5 : CONCLUION :**

On a fait dans ce chapitre la modélisation de notre robot Bras manipulateur de 4 ddl et pour faire sa a nécessité la démarche suivante :

- Représenter le comportement de ce robot sous la forme d'un modèle géométrique direct modèle géométrique inverse qui permet d'exprimer la situation de l'organe terminal.
- Trouver le modèle mathématique du moteur à CC.
- Faire une description mécanique des différentes parties du robot.

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

**Chapitre 03 :**  
**Conception et**  
**réalisation d'un bras**  
**manipulateur**

### **III.1 : Introduction :**

Généralement, la fonction d'un robot manipulateur est de situer dans l'espace son organe terminal, la commande d'un bras manipulateur nécessite la commande de ses articulations une à une, afin de réaliser une tâche. Dans ce chapitre, on cherche à commander le BM pour détecter les couleurs de pièces et placé chaque couleur dans s'apropre chariot.

### **III.2 : Partie 1 : Conception matérielle et logicielle**

#### **III.2.1 : Introduction :**

Dans cette partie de notre travail nous allons voir les différents composent électrique constitutifs du bras manipulateur et comment les brancher et les différents logiciels utilisé pour développer notre travaille

#### **III.2.2 : Hardware**

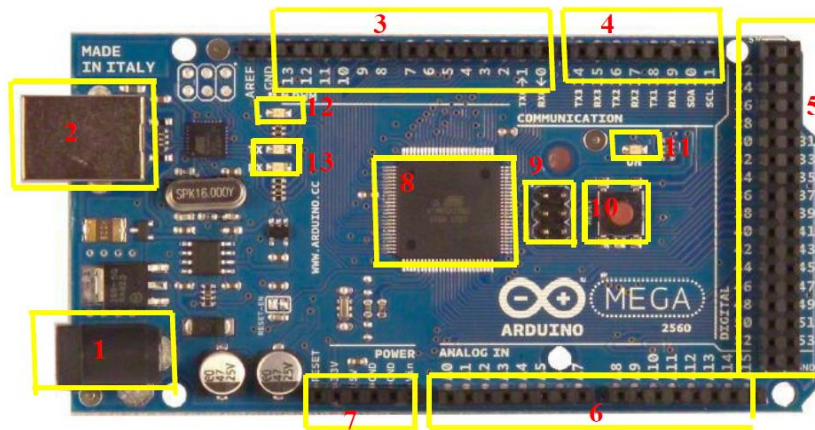
##### **III.2.2.1 : La carte d'Arduino :**

La carte Arduino est un microcontrôleur open source, qui a été adopté par la communauté des concepteurs. Il s'agit d'un système numérique à processeur entouré d'une mémoire et des interfaces avec le monde extérieur.

Ces microcontrôleurs ont des performances réduites, mais sont de faible taille et consomment peu d'énergie, les rendant indispensables dans toute solution d'électronique embarquée (voiture, porte de garage, robots, ...). La carte Arduino n'est pas le microcontrôleur le plus puissant, mais son architecture a été publiée en open-source [34].

##### **III.2.2.1.1 : Arduino méga 2560 :**

L'Arduino Méga est une carte électronique basée sur le microcontrolleur ATmega2560. Elle dispose de 54 broches numériques d'entrée/sortie (dont 14 peuvent être réutilisés comme Sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur cristal de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, et un bouton de remise à zéro. Elle contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur. Comme vous pouvez le constater a l'examen de sa photo visible de [35].



**Fig.III.1.** Arduino Méga [35].

1. Prise d'alimentation (connecteur jack). Sert à alimenter la carte.
2. Port série. Sert à l'alimentation et au transfert de données par USB.
3. Les ports PWM (largeur d'impulsion modulée) broches 0 à 13. Ils servent d'entrée ou de sortie analogique ou digitale. Ils servent aussi à créer des fréquences.
4. Les ports de communication. Des ports séries.
5. 31 Pins digital d'entrée ou de sortie. Elles ont deux états: LOW et HIGH (0v et 5v).
6. 16 Pins d'entrée analogiques permettent de convertir une tension analogique  $V_e$  de 0 à 5 V en une valeur numérique N (en décimale) d'une résolution de 10 bits (1024 niveaux).
  - Si  $V_e = 0V$  on lit  $N = 0$
  - Si  $V_e = 5 V$  on lit  $N = 1023$
7. Broches d'alimentation. elles contiennent :
  - 5V : tension régulée par la carte
  - 3,3V : tension régulée par la carte
  - $V_{in}$  : tension issue de l'alimentation externe de 7/12V
  - GND : la masse
  - Entrée reset. Connectez-la au grounds pour reset la carte. (Comme le bouton reset)
8. Le microcontrôleur Atmega2560
9. Une prise ICSP. Elle sert à télécharger le bootloader dans le microcontrôleur.
 

Pour info ; le boot loader est un programme préprogrammé une fois pour toute dans l'ATMéga et qui permet la communication entre l'ATMéga et le logiciel Arduino via le port USB, notamment lors de chaque programmation de la carte.
10. Bouton reset (remise à zéro). Sert à redémarrer la carte pour relancer le Programme.
11. LED verte qui montre que la carte est allumée.
12. LED jaune qui indique l'activité du processeur. Peut être commandée par le pin PWM 13.
13. LEDs jaunes qui indiquent l'utilisation du port série

**Tableau III.1.** Synthèse des caractéristiques d'Arduino Mega2560 [35].

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	54(dont 14 disposent d'une sortie PWM
Broches d'entrées analogiques	16(utilisables en bouches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5v)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3v	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5v	Fonction de l'alimentation utilisée -500 mA mas si port USB utilisée seul
Mémoire programme Flash	256 KB dont 8 KB sont utilisée par le boot loader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	4 KB
Vitesse d'horloge	16 MHz
Longueur	101 .52 mm
Largeur	53.3 mm
Poids	37 g

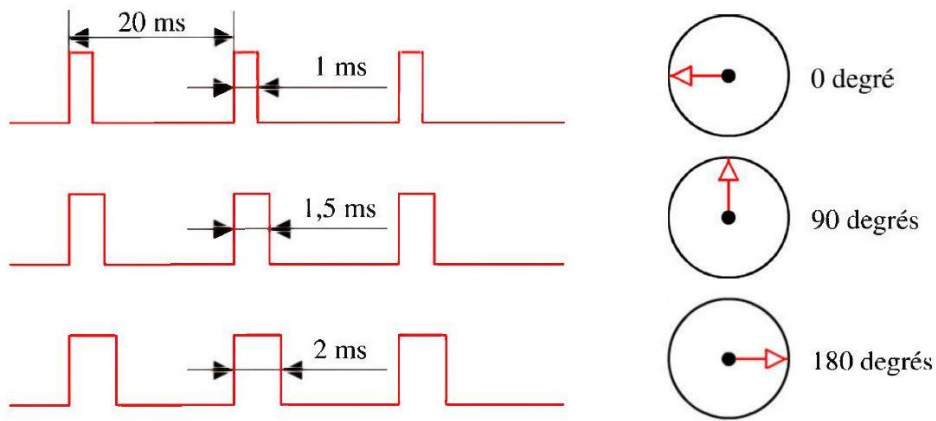
### III.2.2.2 : Les actionneurs

#### III.2.2.2.1 : les servomoteurs :

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

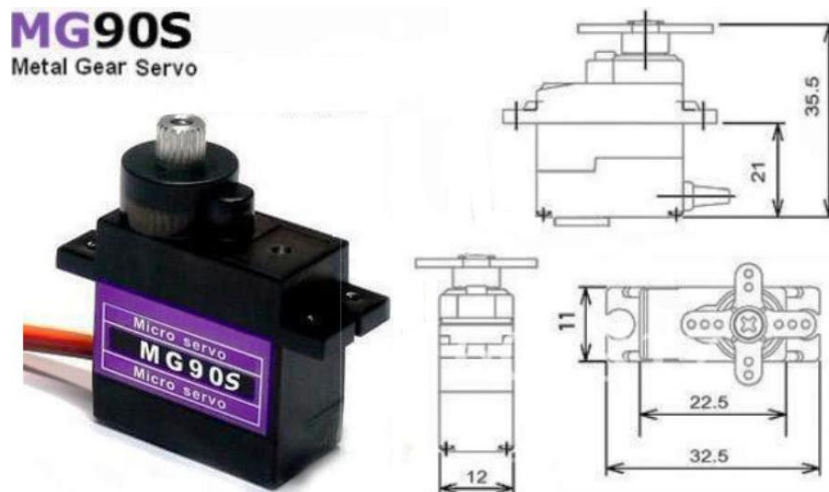
Le signal de commande est de type modulation de largeur d'impulsion (PWM). En modifiant le rapport cyclique de ce signal, on indique au moteur quelle est la position désirée dans une plage de positions possibles, généralement [0,180°].

La fréquence du signal à modulation de largeur d'impulsion est habituellement de l'ordre de 50 Hz (30 Hz pour certains modèles) avec des impulsions durant de 1 à 2 ms [36] comme illustre la fig.III.2. Certaines plages de mouvement plus importantes peuvent être obtenues en changeant les engrenages du servomoteur [36].



**Fig.III.2.** Exemple de signal en position pour un servomoteur (PWM). [36]

Dans notre réalisation nous avons utilisé un seul type de servomoteurs qui est illustré ci-dessous :



**Fig.III.3.** Servomoteur de type MG90S [37]

### III.2.2.2.1.1: Paramètres techniques de servomoteur MG90S :

**Tableau III. 2.** Paramètres techniques de servomoteur MG90S [37]

Spécifications	Références	MG90S
Poids		13.4 g
Couple d'arrêt		1.8 kgf·cm (4.8V) , 2.2 kgf·cm (6 V)
Tension de fonctionnement		4.8 V à 6 V
Vitesse		0.1 s/60 degree (4.8 V), 0.08 s/60 degree (6 V)
Rotation angle		180°

### III.2.2.2.1.2 : Branchement Servomoteur avec La carte Arduino :

On utilise logiciel Fritzing Version 0.9.3

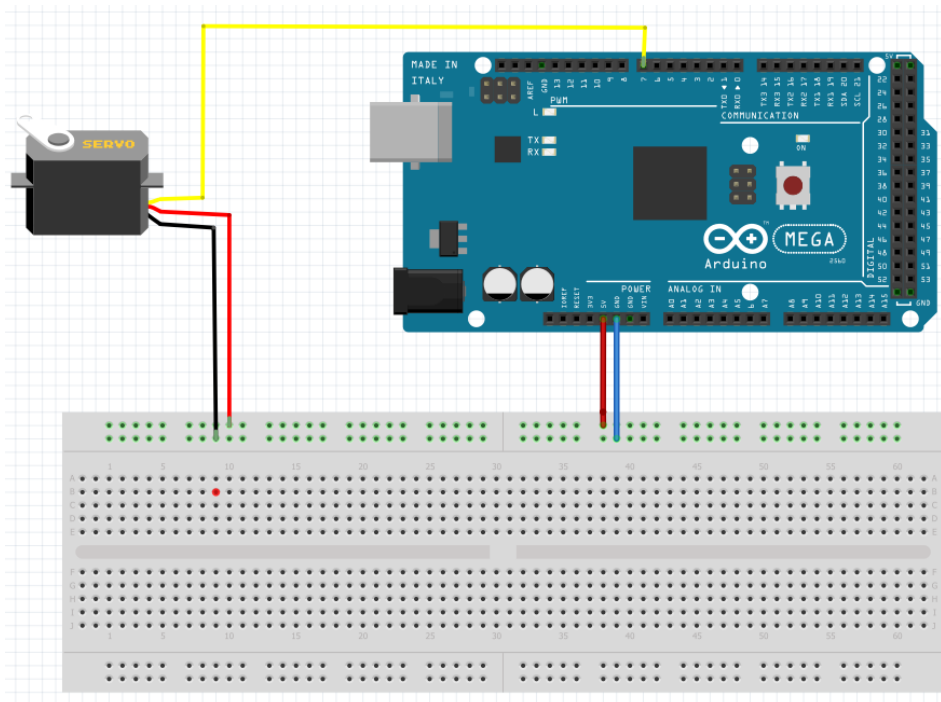


Fig.III.4 Branchement Servomoteur avec La carte Arduino

### III.2.2.2.2 : Moteur Pas a Pas :

Un moteur pas à pas est une machine qui tourne en fonction des impulsions électriques reçues dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas ( $\phi_p$ ). On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est à dire pour  $360^\circ$ ). Le nombre du pas par tour est déterminé par la relation suivante :

$$N_p = \frac{2\pi}{\phi_p} \quad (\text{III.01})$$

On peut dire, le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique destiné à transformer le signal électrique (impulsion ou train d'impulsion) en déplacement (angulaire ou linéaire) mécanique. Il existe plusieurs types des moteurs pas à pas selon leurs différents principes de réalisations. Néanmoins, on utilise dans les schémas électriques un seul symbole unique [38]

### III.2.2.2.1 : Moteur Pas a Pas 28BYJ-48 :

Le 28BYJ-48 est un petit **moteur pas à pas de type unipolaire**, et facile à intégrer avec Arduino, car il dispose d'un modèle de module pilote / contrôleur ULN2003A qui est généralement inclus avec lui. Le tout pour un prix très bon marché et une taille assez compacte. Ces fonctionnalités permettent également de commencer à pratiquer avec ces appareils [39].



**Fig.III.5.** Moteur Pas n'a Pas 28BYJ-48 [39]

### III.2.2.2.2 : Caractéristiques [40] :

- |                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| • Tension nominale :                 | 5 VDC                               |
| • Nombre de phase :                  | 4                                   |
| • Rapport de variation de vitesse    | 1/64                                |
| • Angle de foulée                    | 5.625° /64                          |
| • Fréquence                          | 100Hz                               |
| • Résistance CC                      | 50Ω±7% (25°C)                       |
| • Fréquence d'inactivité en traction | > 600Hz                             |
| • Fréquence de traction au ralenti   | > 1000Hz                            |
| • Couple en traction                 | > 34,3 mN.m (120 Hz)                |
| • Couple d'auto-positionnement       | > 34,3 mN.m                         |
| • Couple de friction                 | 600-1200 gf.cm                      |
| • Couple de traction                 | 300 gf.cm                           |
| • Résistance isolée                  | > 10 MΩ (500 V)                     |
| • Alimentation électrique isolée     | 600VAC/1mA/1s                       |
| • Classe d'isolation A               |                                     |
| • Augmentation de la température     | <40K (120Hz)                        |
| • Bruit                              | <35 dB (120 Hz, sans charge, 10 cm) |
| • Modèle                             | 28BYJ-48 – 5V                       |

### III.2.2.2.3 : Module Driver ULN2003

Il s'agit de la carte de pilote de moteur pas à pas ULN2003 (Fig.III.6), de petite taille et facile à utiliser. Il utilise la puce du pilote ULN2003 pour amplifier le signal de contrôle de l'Arduino, cette option ultra légère et bon marché couramment utilisée pour exécuter et contrôler les moteurs pas à pas de petites applications. [41]

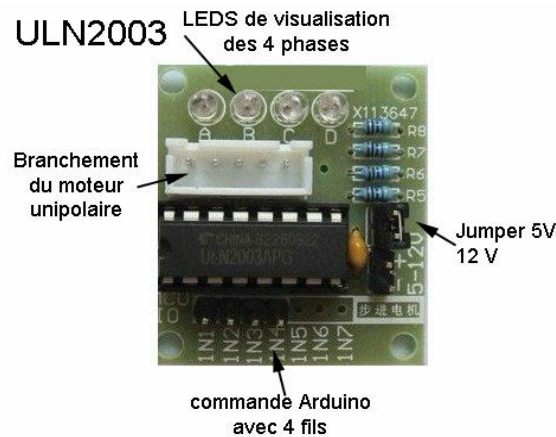


Fig.III.6 ULN2003 [41]

#### III.2.2.2.3.1 : Caractéristiques Driver ULN2003A :

- Tension de fonctionnement 5V
- Tension de pilotage 5V-12V
- Dimensions du module : 31mm x 35mm
- Des diodes de visualisation permettent de contrôler le bon fonctionnement des 4 phases (A, B, C, D)

#### III.2.2.2.4 Brochage du Moteur Pas a Pas et Module Driver ULN2003 avec La carte Arduino :

On utilise le logiciel Fritzing Version 0.9.3

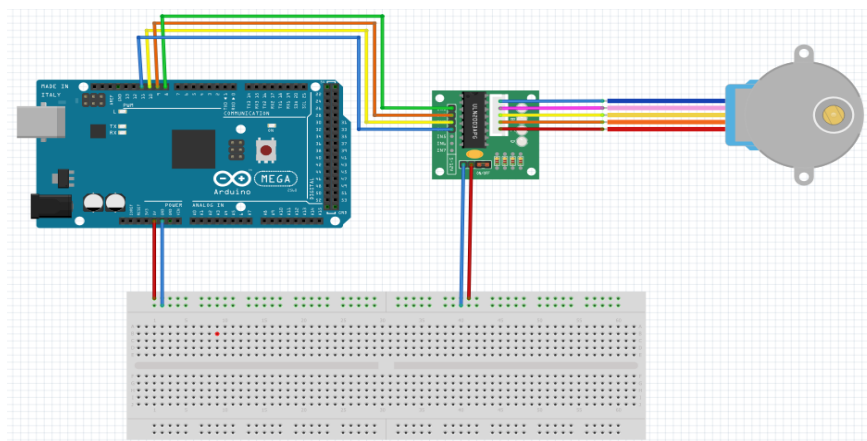


Fig.III.7 Branchement Moteur Pas n'a Pas avec La carte Arduino

### III.2.2.3 : Les Capteurs :

Le rôle des capteurs est de gérer les relations entre le robot et son environnement. Ils permettent de contrôler plus facilement les tâches qu'on lui ordonne.

Il est important de distinguer deux types de capteurs :

- Les capteurs proprioceptifs qui mesurent l'état mécanique interne du robot,
- Les capteurs extéroceptifs qui recueillent des informations sur l'environnement

En ce qui concerne les capteurs que nous utilisons dans notre projet :

- les capteurs proprioceptifs : on n'a pas besoin d'ajouter ce type de capteurs dans notre projet, car on déjà il y'a des capteurs de position intégrés dans les servomoteurs.

- les capteurs extéroceptifs : nous utilisons deux types différents, capteurs de proximité infrarouge FC51 et Capteur de couleur TSC230, où nous travaillons dans ce projet pour détecter et trier les pièces que vient sur le tapis roulant et décharge les pièces par couleur pour chaque pièce [42].

#### III.2.2.3.1 : capteurs de proximité infrarouge FC51 :

Le capteur de proximité FC-51 est composé d'une diode infrarouge (émetteur) et d'une photodiode (récepteur). Suivant la distance à laquelle se trouve l'obstacle, le récepteur recevra plus ou moins de lumière infra-rouge réfléchi.

Plus précisément, un émetteur IR, ou LED IR, envoie un signal infrarouge à une longueur d'onde particulière compatible avec un récepteur IR, qui a pour tâche de le détecter

Le capteur est équipé d'une vis qui permet de régler la distance de détection [43].



**Fig.III.8.** Capteurs de proximité infrarouge FC51[43]

### III.2.2.3.1.1 l'emplacement et le fonctionnement de capteur de proximité infrarouge FC51 :

On a utilisé deux capteurs un à l'avant de tapis roulante et un à l'arrière, le premier capteur pour détecter l'arrivée de la pièce a le tapis roulant, et le deuxième pour détecter l'arrivée de pièce a la fin de tapis roulante

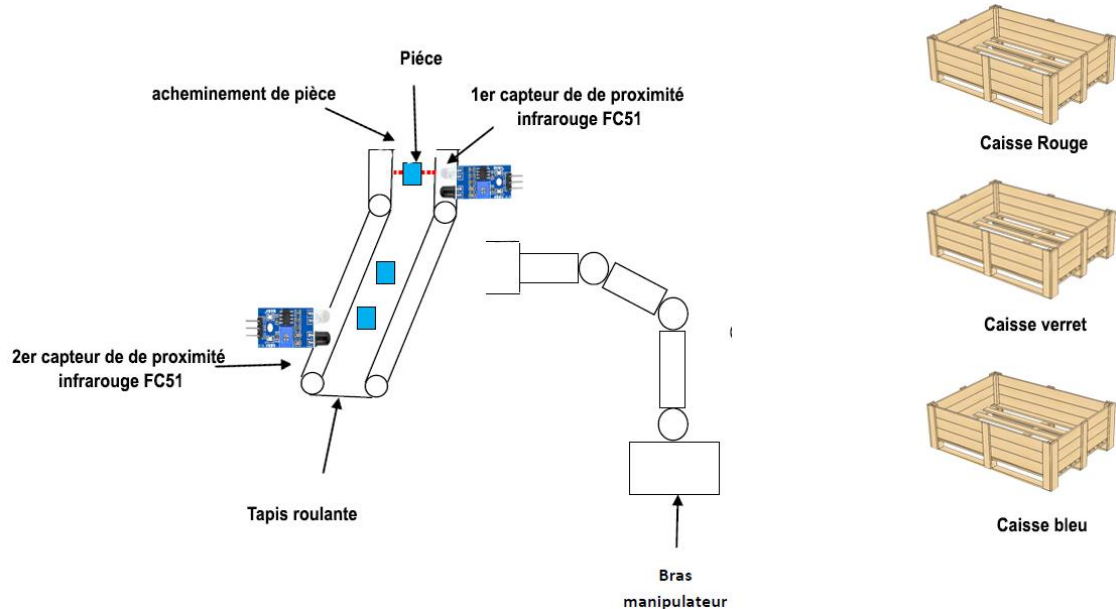


Fig.III.9. Le placement captures de proximité infrarouge FC51

En général, la fonction du capteur est d'envoyer des rayons infrarouges à travers l'émetteur, qui est une LED. S'il n'y a pas variation ou de coupure de rayons infrarouges, sa veut dire aucun délectation de pièce il envoie un signal numérique faible "0"

Et s'il y a une variation ou une coupure dans les rayons, la pièce détectée réfléchit les rayons infrarouges, de sorte que le récepteur le recevra par une photodiode, où il envoie un signal numérique haut "1"

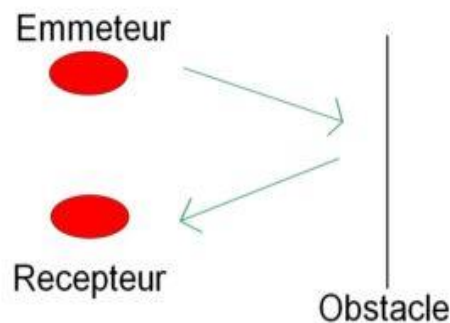


Fig.III.10. Principe de fonctionnement de capteur FC51[43]



### III.2.2.3.2 : Capteur de couleur TSC230 :

Le convertisseur couleur programmable lumière-fréquence TCS230 combine des photodiodes au silicium configurables et un convertisseur courant-fréquence sur un seul circuit intégré CMOS monolithique. La sortie est une onde carrée (cycle de service de 50 %) avec une fréquence directement proportionnelle à l'intensité lumineuse (irradiance). La fréquence de sortie pleine échelle peut être mise à l'échelle par l'une des trois valeurs prédéfinies via deux broches d'entrée de commande. Les entrées numériques et la sortie numérique permettent une interface directe avec un microcontrôleur ou un autre circuit logique. L'activation de sortie (OE) place la sortie dans l'état d'impédance élevée pour le partage de plusieurs unités d'une ligne d'entrée de microcontrôleur.

Le convertisseur lumière-fréquence lit un réseau 8 x 8 de photodiodes. Seize photodiodes ont des filtres bleus, 16 photodiodes ont des filtres verts, 16 photodiodes ont des filtres rouges et 16 photodiodes sont claires sans filtres. Les quatre types (couleurs) de photodiodes sont interdigités pour minimiser l'effet de non-uniformité de l'irradiance incidente. Les 16 photodiodes de la même couleur sont connectées en parallèle et le type de photodiode utilisé par l'appareil pendant le fonctionnement est sélectionnable par broche. Les photodiodes ont une taille de 120  $\mu\text{m}$  x 120  $\mu\text{m}$  et sont sur des centres de 144  $\mu\text{m}$ [45]

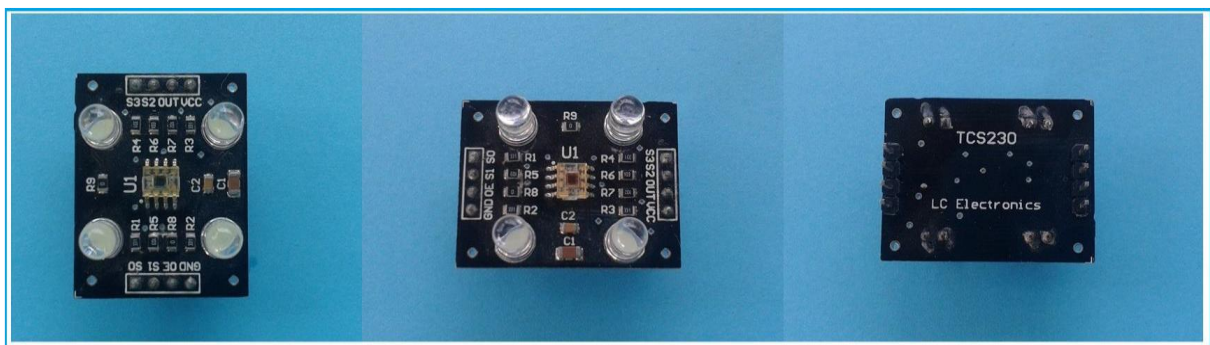


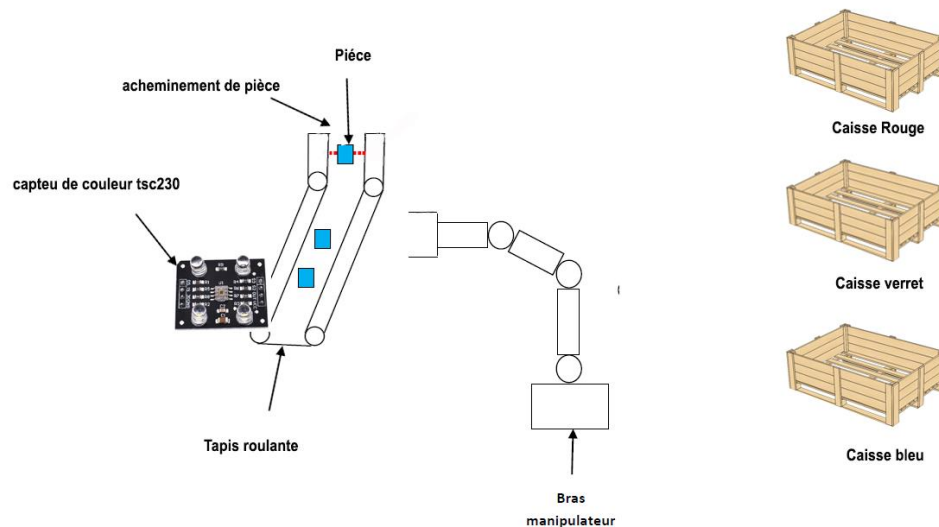
Fig.III.13. Capteur De Couleur TSC230 [45]

#### III.2.2.3.2.1 : Caractéristiques [45] :

- Conversion haute résolution de l'intensité lumineuse en fréquence
- Couleur programmable et fréquence de sortie pleine échelle
- Communique directement avec un microcontrôleur
- Fonctionnement à alimentation unique (2,7 V à 5,5 V)
- Fonction de mise hors tension
- Erreur de non-linéarité Typiquement 0,2 % à 50 kHz
- Coefficient de température stable de 200 ppm/°C
- Ensemble de montage en surface à profil bas

### III.2.2.3.2.2 . Le placement et sa fonctionnement capteur de couleur tsc230 :

Dans notre projet, le placement du capteur de couleur tsc280 est l'arrière de tapis roulante. où lorsque la pièce atteint l'arrière de tapis roulante il s'arrête et après le capteur connaît la couleur de la pièce et à partir de la couleur détecte le BM est recharge la pièce dans sa propre caisse



**Fig.III.14.** Le placement capteur de couleur Tsc230

En générale le mécanisme de fonctionnement de capteur de couleur tsc230 est complètement identique au mécanisme de la vision et de la discrimination des couleurs, donc en utilisant des photodiodes, une lumière blanche est projetée sur le corps qui absorbe toutes les longueurs d'onde à l'exception de sa couleur et en est réfléchi. Conversion du courant en un signal carré ( 50 % de modulation) à une fréquence directement proportionnelle à l'intensité de l'éclairage[46]

Où lorsque la fréquence d'une couleur particulière est supérieure aux fréquences des autres couleurs, le capteur reconnaît la couleur que a haut fréquence

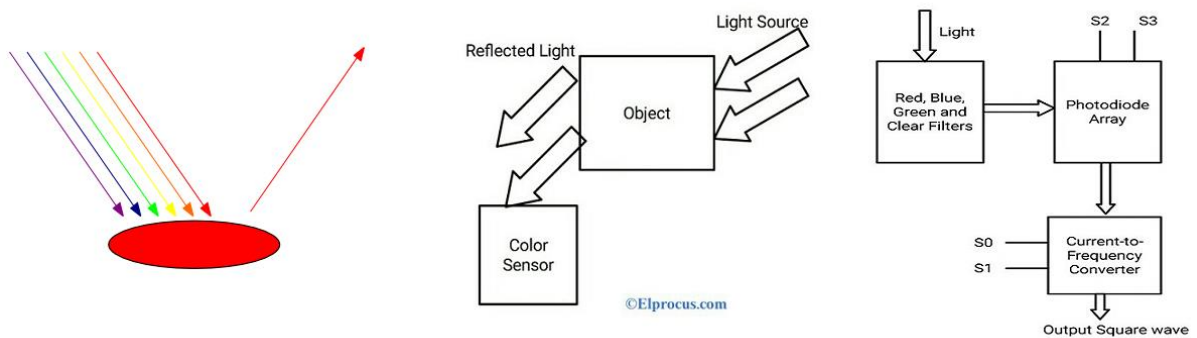
Par exemple, si la fréquence de la couleur bleue est supérieure à la fréquence de la couleur verte et rouge, le capteur reconnaît la couleur bleue

Dans notre projet on utilise les fréquences :

	<b>R</b>	<b>G</b>	<b>B</b>
<b>ROUGE</b>	<b>150</b>	<b>450</b>	<b>330</b>
<b>BLEU</b>	<b>500</b>	<b>360</b>	<b>160</b>
<b>VERT</b>	<b>400</b>	<b>250</b>	<b>270</b>

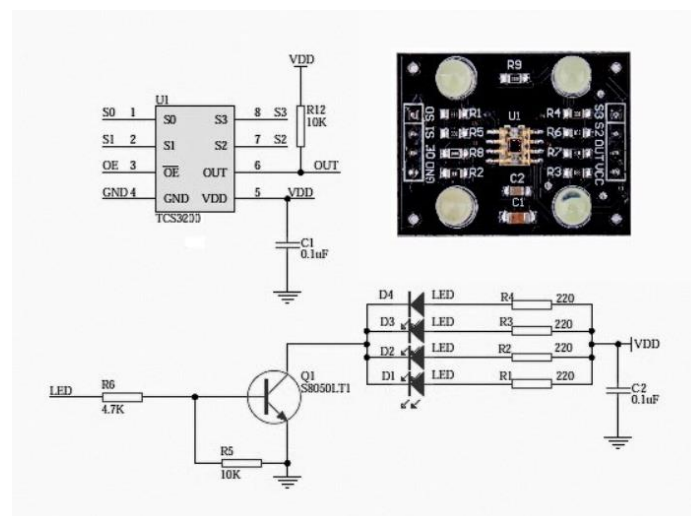
**Tableau III. 3 .** Les fréquences utilisé dans notre projet

- Si rouge < bleu et rouge < vert = Rouge.
- Si bleu < rouge et bleu < vert = Bleu.
- Si vert < rouge et vert < bleu = vert .



**Fig.III.15.** fonctionnement de capteur de couleur tsc230 [46]

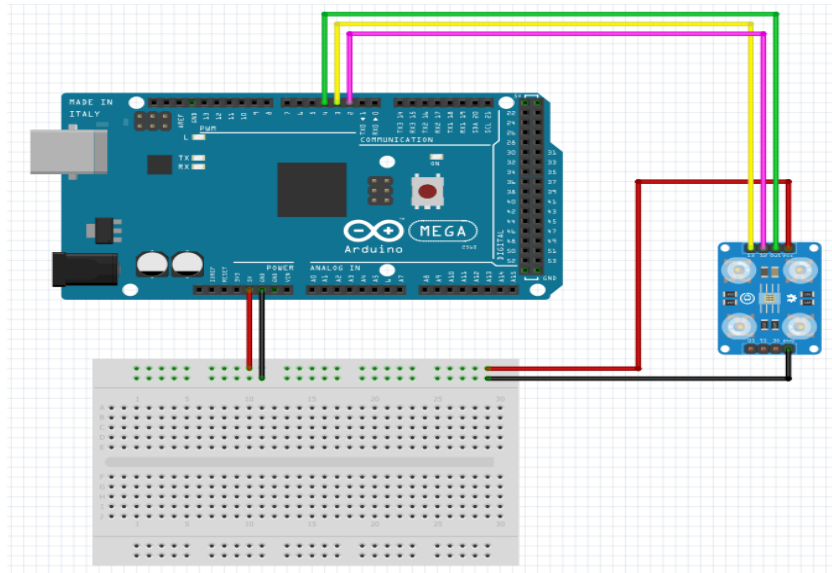
### III.2.2.3.2.3 Schéma du capteur de couleur tsc230 :



**Fig.III.16.** Schéma du capteur de couleur tsc230[47]

### III.2.2.3.2.4 : brochage de capteurs De couleur TSC230 :

On utilise logiciel Fritzing Version 0.9.3



III.17. Brochage de capteurs De couleur TSC230

### III.2.2.4 : Fils de connexion :

Un fil électrique qui relie les dipôles d'un circuit entre eux. Son rôle est de permettre au courant électrique de circuler entre ces dipôles. Les fils de connexion sont utilisés au collège car ils permettent de réaliser facilement des connexions [48].

Il y a 3 types de Fils de connexion :

- Male-Male.
- Male-Female.
- Female-Female.

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

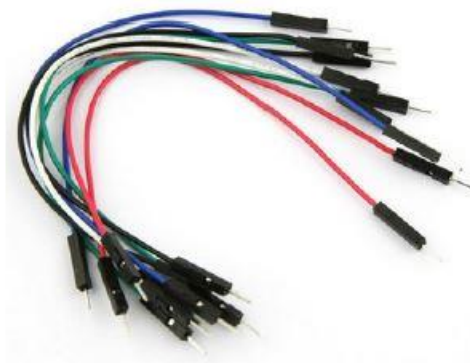


Fig.III.18. Fils de connexion. [48].

### III.2.2.5 : Les LED

La LED est un composant opto-électronique. Cela veut simplement dire qu'il s'agit d'un composant électronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens – de l'anode vers la cathode (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) de plus elle produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse. [49]

La Fig.III.14 montre les LED



**Fig.III.19.** LED [49]

### III.2.2.6 : Bouton poussoir :

Un bouton-poussoir (également orthographié bouton-poussoir) ou simplement un bouton est un simple mécanisme de commutation permettant de contrôler certains aspects d'une machine ou d'un processus. Les boutons sont généralement fabriqués à partir de matériaux durs, généralement en plastique ou en métal, la surface est généralement plate ou façonnée pour accueillir le doigt ou la main humaine, de manière à être facilement enfoncée ou poussée.[50]

La fig.III.15 montre un bouton-poussoir

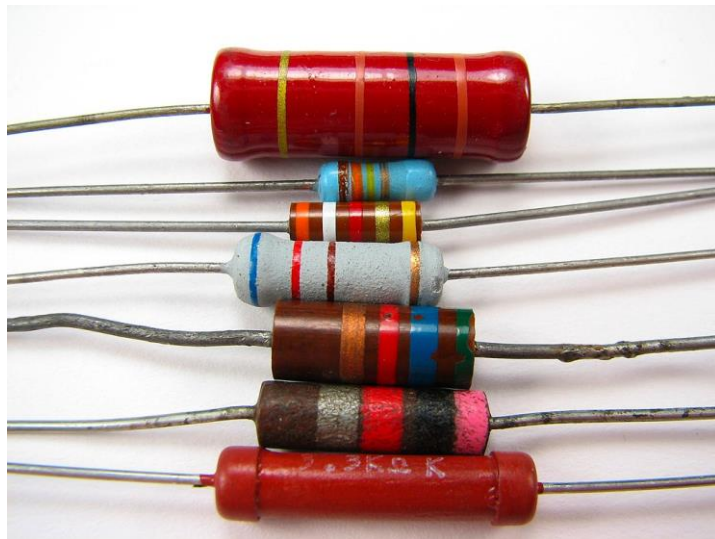


**Fig.III.20.** Bouton poussoir [50]

### III.2.2.7 : Les résistances

Une résistance ou resistor est un composant électronique ou électrique dont la principale caractéristique est d'opposer une plus ou moins grande résistance (mesurée en ohms) à la circulation du courant électrique.[51]

La Fig.III.21 montre les résistances



**Fig.III.21.** Les différents types de résistances.[51]

### III.2.3 : Software

#### III.2.3.1: logiciel FRITZING :

##### III.2.3.1.1 : Implémentation et simulation du projet sous FRITZING :

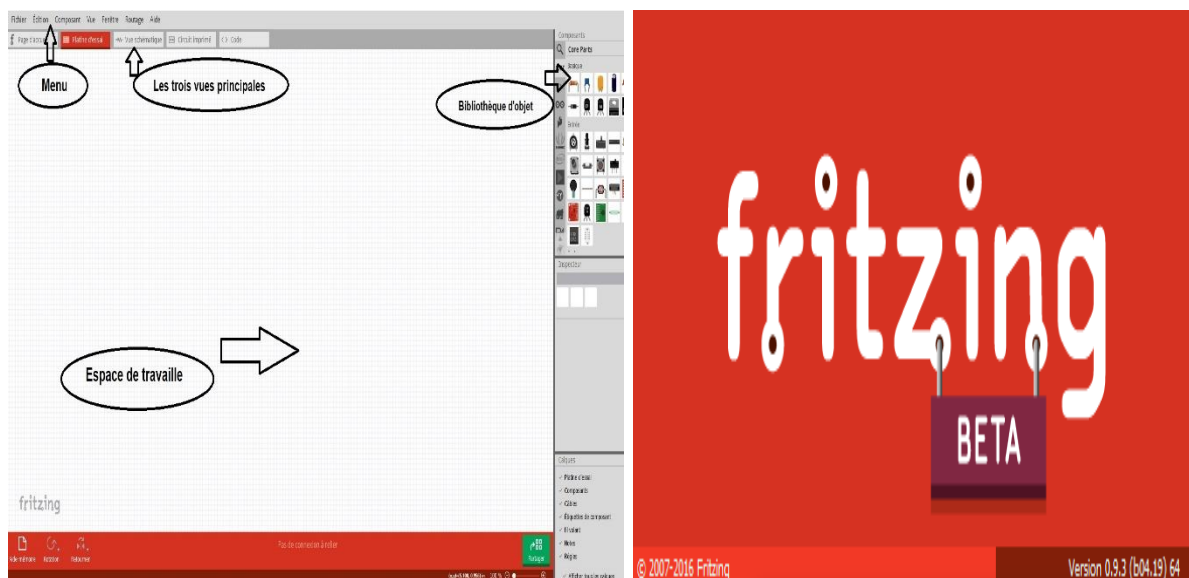
En réalité, avant la réalisation pratique, notre projet a fait l'objet d'une implémentation sous FRITZING. Ce qui a permis de simuler le projet et de vérifier le bon fonctionnement des différentes parties avant l'implantation pratique.

##### III.2.3.1.2 : Présentation du logiciel FRITZING :

Fritzing est un logiciel libre conception électronique (EDA) Focalisés sur la transition de prototypes simples (sur la base de breadboard) à carte de circuit imprimé à envoyer à la production. Il a été développé par 'Interaction Design Lab de Fachhochschule Potsdam (Université des Sciences Appliquées Potsdam)

Fritzing a été créé dans le même esprit de arduino et traitement, à-dire pour faire en sorte que les concepteurs, les artistes, les amateurs ou les chercheurs peuvent documenter leurs prototypes basés sur Arduino et créer des circuits imprimés à fabriquer. Le site web du projet favorise le processus de partage des prototypes afin de réduire les coûts de production grâce à la contribution de la communauté dans la conception.

Fritzing peut être considérée comme un instrument de Electronic Design Automation pas adressé à un ingénieur de l'utilisateur : la métaphore d'entrée est celle de l'environnement du concepteur de prototypes basé sur breadboard, tandis que la production, il n'y a pas beaucoup d'options, et vous concentrer sur les moyens de production accessibles [52].



(A)

(B)

Fig.III.22. De gauche à droite : (A) Logiciel Proteus Fritzing, (B) Interface de Fritzing.

### III.2.3.1.3 Etapes de création des schémas électriques :

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

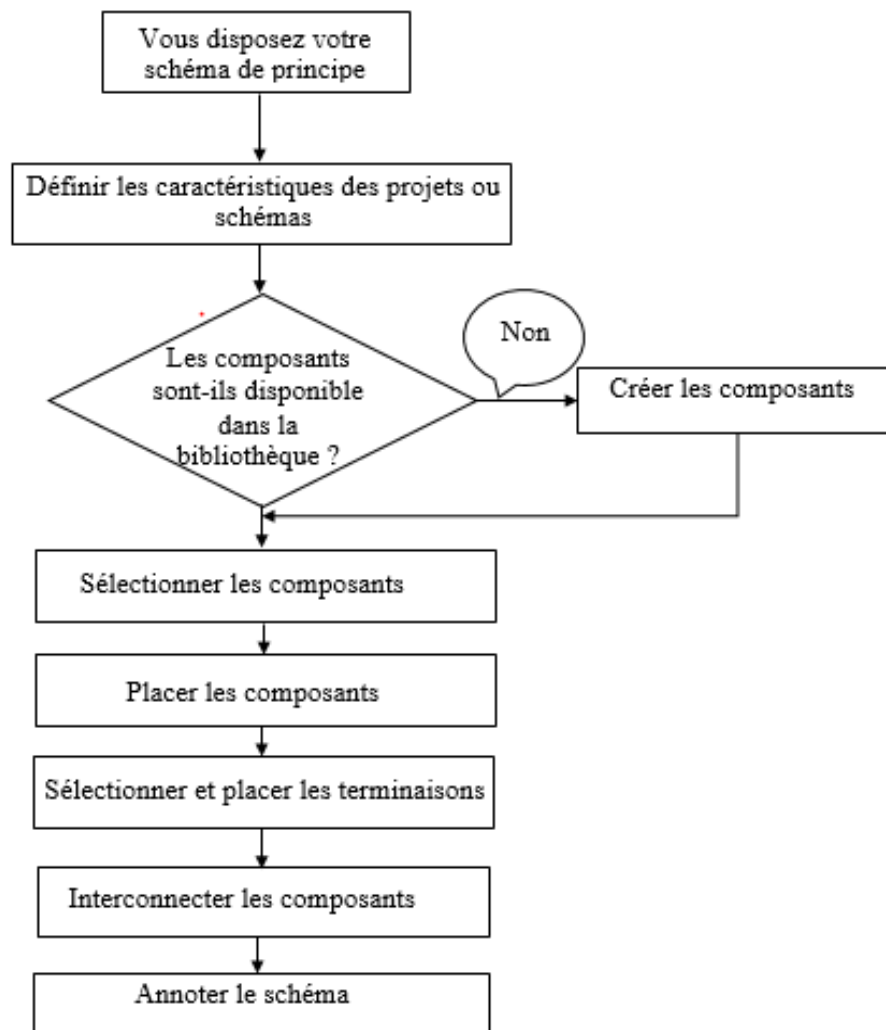
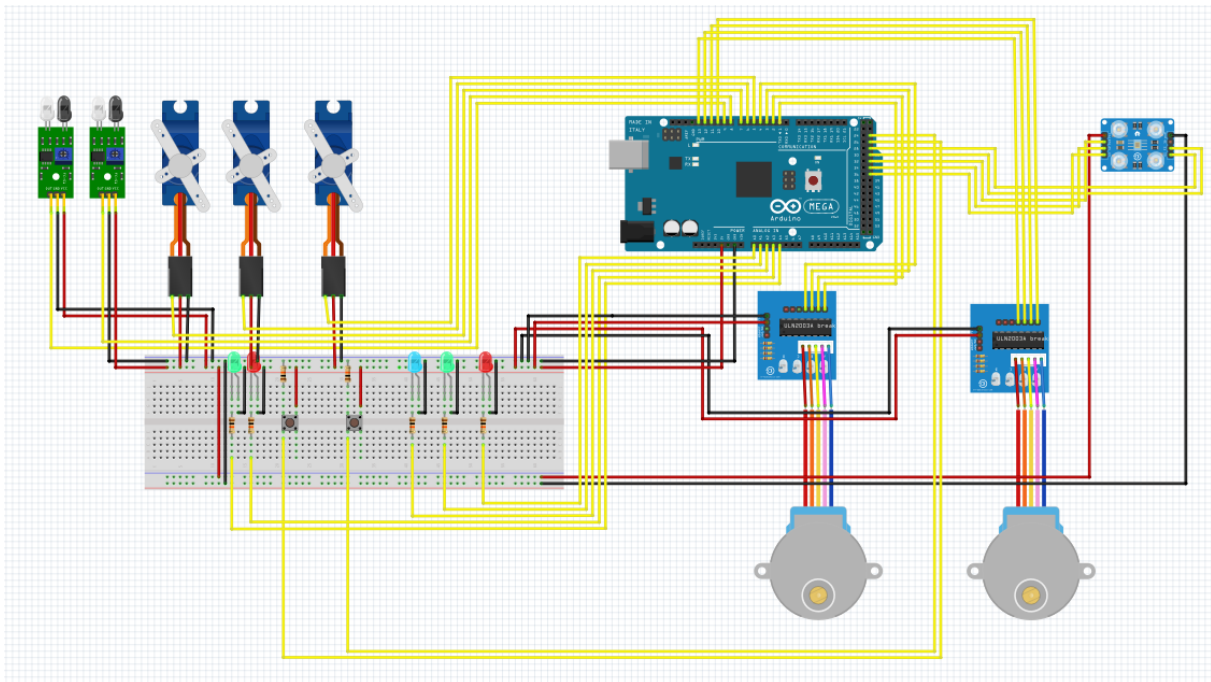


Fig.III.23. Organigramme des étapes de la saisie des schémas.

### III.2.3.1.4 : Description du branchement de BM1 :

- Un Arduino de type Méga 2560.
- Trois servomoteur MG90S.
- Deux Moteur pas a pas 28BYJ-48.
- Deux Module Driver ULN2003.
- Deux boutons poussoirs pour : Marche, arrêt .
- Capteurs De couleur TSC230.
- Deux Capteurs de proximité infrarouge FC51.
- Cinq LED Pour indication.

La figure suivante représenté le câblage de notre robot avec l'Arduino :



**Fig.III.24.** Branchement total du BM

### III.2.3.2 Logiciel Arduino IDE

#### III.2.3.2.1 : Programmes Arduino :

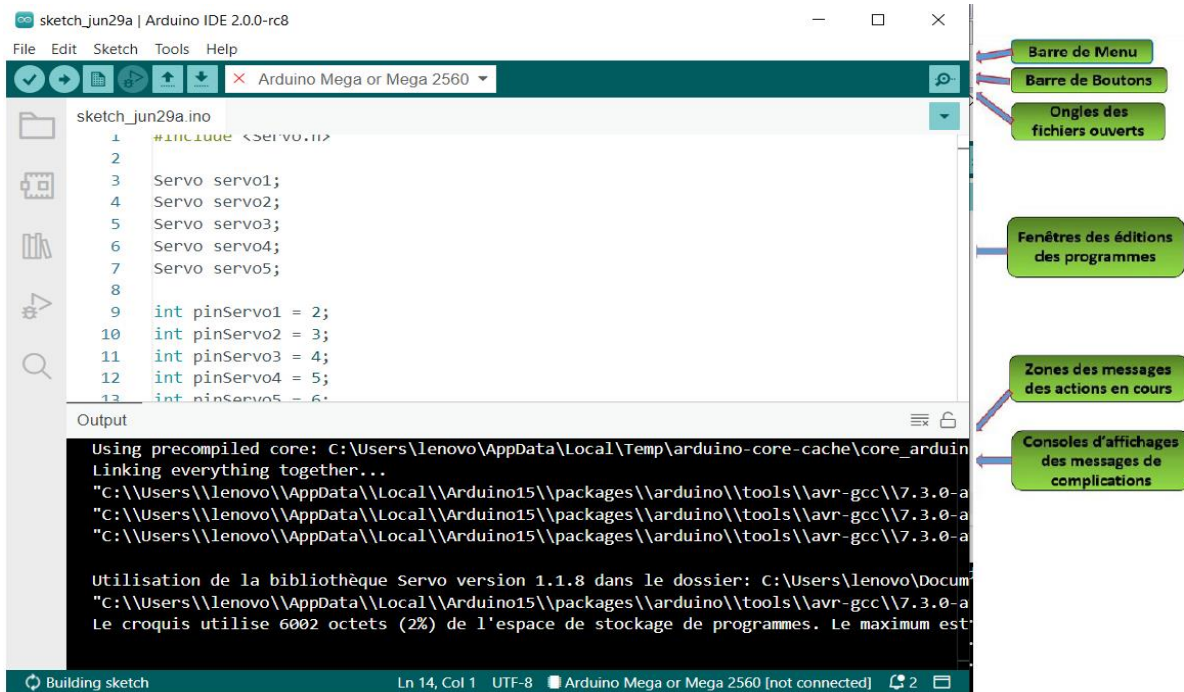
Les programmes Arduino sont écrits dans l'environnement de développement intégré Arduino (IDE). Arduino IDE est un logiciel spécial fonctionnant sur votre système qui vous permet d'écrire des croquis (synonyme de programme en langue Arduino) pour différentes cartes Arduino.

Le langage de programmation Arduino est basé sur un langage de programmation matériel très simple appelé traitement, qui est similaire au langage C. Une fois le croquis écrit dans l'IDE Arduino, il doit être téléchargé sur la carte Arduino pour exécution. L'exécution d'un programme Arduino s'effectue de manière séquentielle, c'est-à-dire que les instructions sont exécutées les unes à la suite des autres.

Syntaxe du langage Arduino est composée de :

- Ponctuation : Le code est structuré par une ponctuation stricte
- Les variables : est un espace réservé dans la mémoire de l'ordinateur. C'est comme un compartiment dont la taille n'est adéquate que pour un seul type d'information.
- Les fonctions : est un bloc d'instructions que l'on peut appeler à tout endroit du programme.

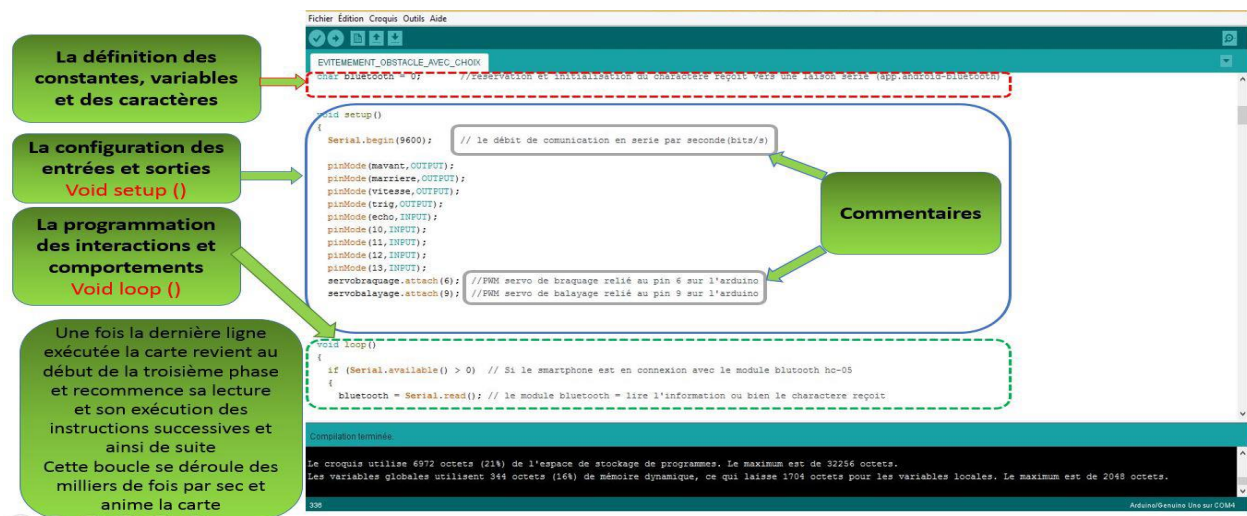
- Les structures de contrôle : Les structures de contrôle sont des blocs d'instructions qui s'exécutent en fonction du respect d'un certain nombre de conditions. Il existe quatre types de structure : (if, else), while, for, (switch/case) [53].



**Fig. III.25.** Interface d'Arduino IDE 2.0 [54]

### III.2.3.2.2 : Structure générale du programme (IDE Arduino)

Un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code. La structure d'écriture d'un programme sous Arduino est de la forme suivante :



**Fig.III.26** Structure générale du programme (IDE Arduino).[54]

### III.2.3.2.3 : Organigramme de notre commande du BM :

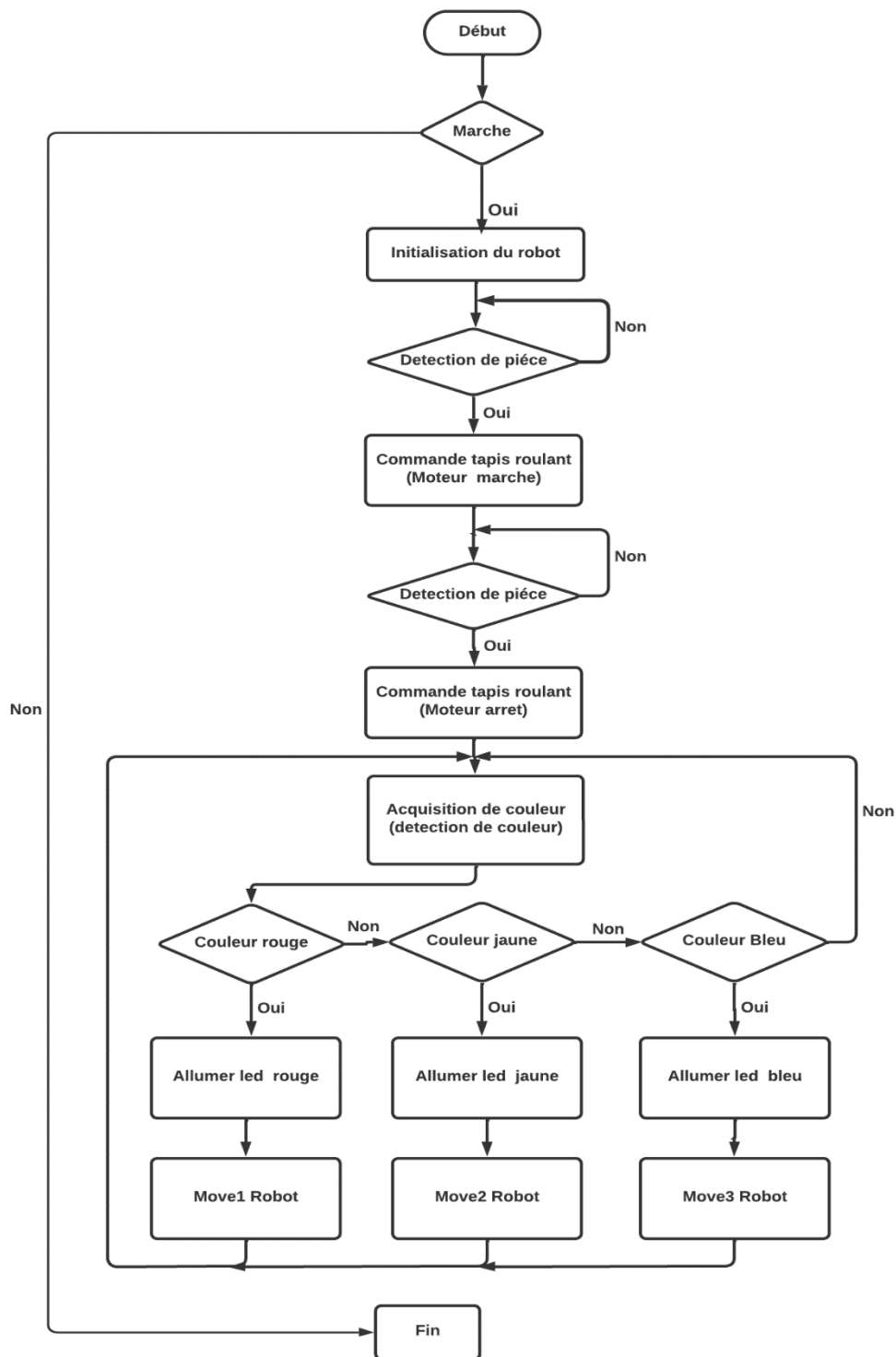


Fig.III.27 Organigramme de notre commande du BM

### III.2.3.4 : Logiciel Blender

#### III.2.3.4.1 : Présentation du logiciel Blender :

Blender est un logiciel libre de modélisation, d'animation par ordinateur et de rendu en 3D, créé en 1998. Il est actuellement développé par la Fondation Blender.

Depuis 2019 le logiciel Blender est de plus en plus reconnu par les entreprises du secteur de l'animation 3D, comme Epic Games, Ubisoft et NVIDIA.

Il propose des fonctions avancées de modélisation (dont la sculpture 3D, le texturage et dépliage UV, etc.), d'animation 3D (rigging, Blend shapes), et de rendu (sur GPU comme sur CPU). Il gère aussi le montage vidéo non linéaire, la composition, la création nodale de matériaux, ainsi que diverses simulations physiques telles que les particules, les corps rigides, les corps souples et les fluides. Ses capacités sont par ailleurs très extensibles, grâce à un système de greffons (addons).[55]

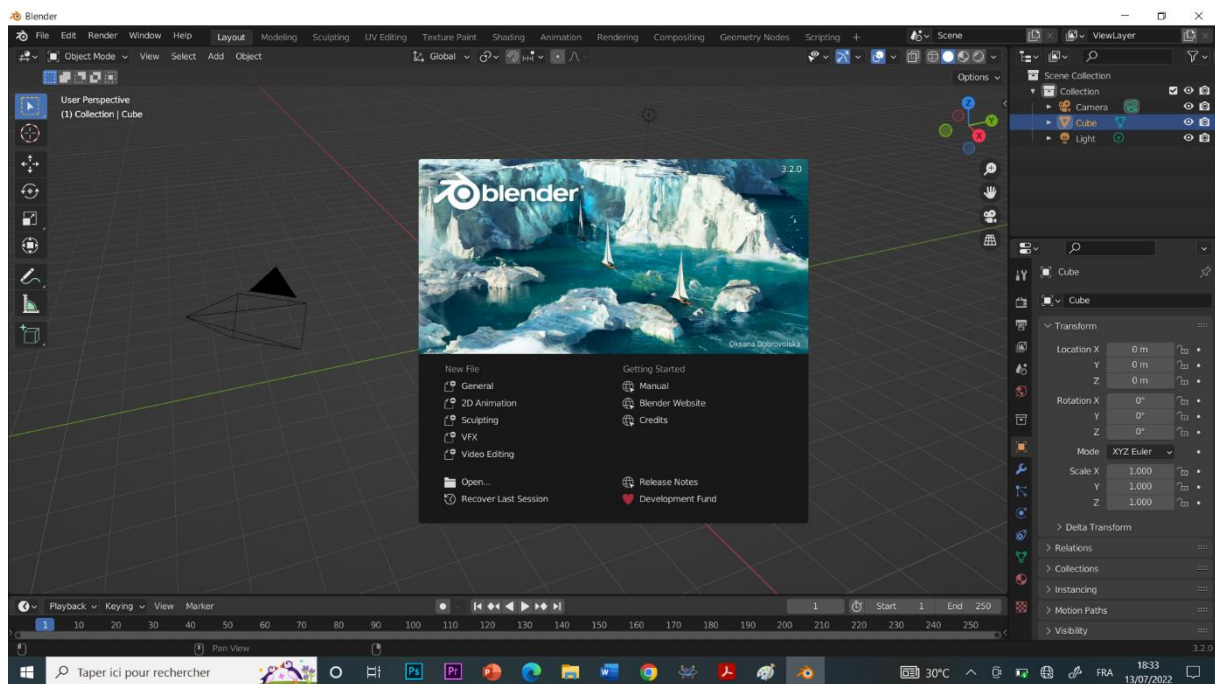


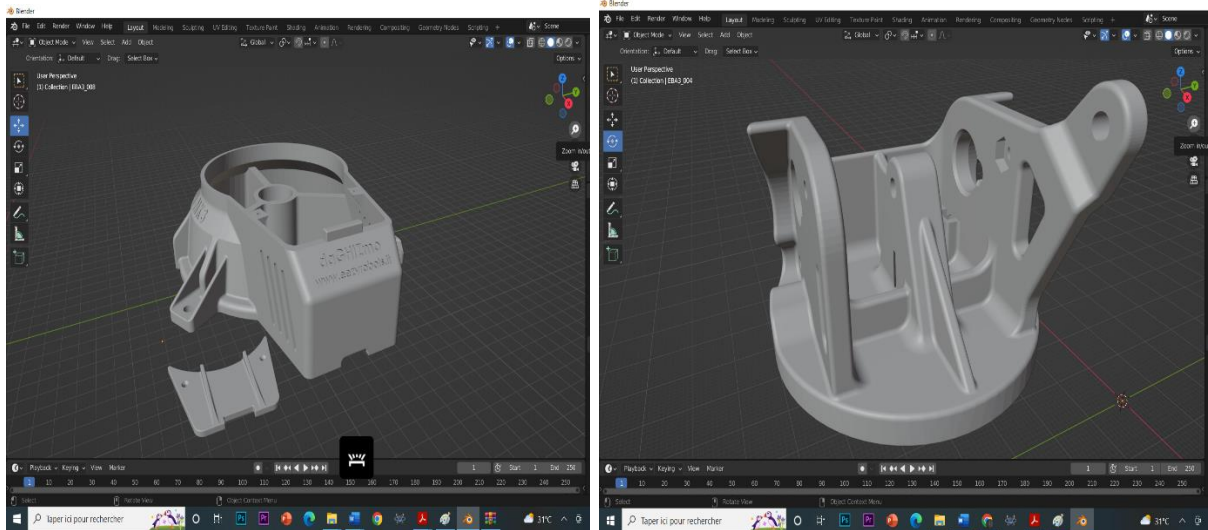
Fig. III.28. Interface Logiciel Blender

#### III.2.3.4.2 : La conception des partie de notre robot :

Les figures ci-dessous représentent la conception des différentes articulations de notre bras manipulateur (les fiches STL [56])

### III.2.3.4.2.1 : La base de BM :

Dans la figure ce dessus une représentation en 3D du la base :



FigIII.29. La Base de Notre BM1

### III.2.3.4.2.2 : Les différentes articulations de BM :

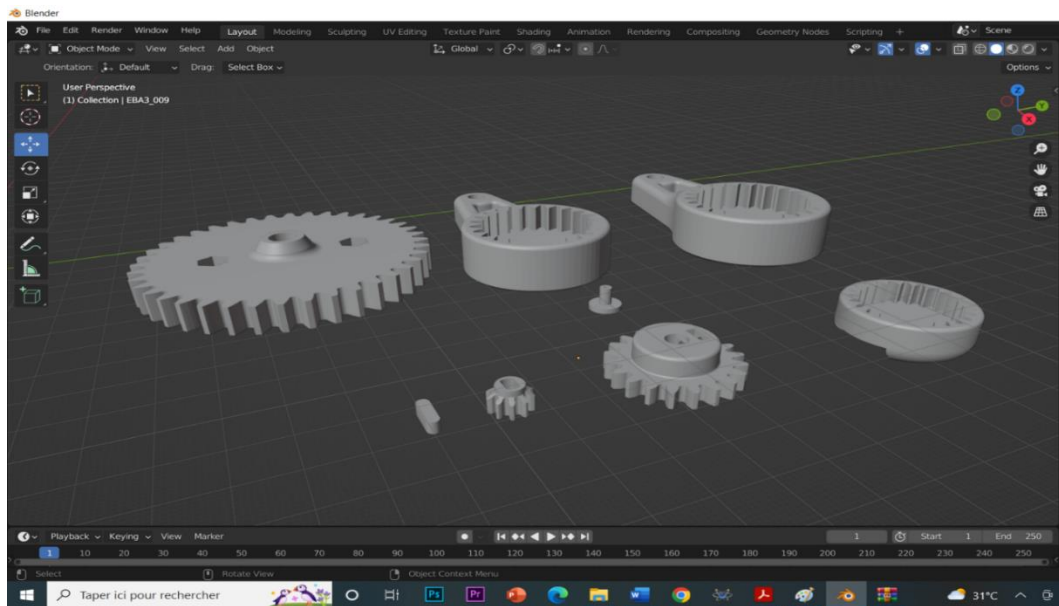
Dans la figure ce dessus une représentation en 3D du l'articulation de bras



FigIII.30 Les différentes articulations de bras manipulateur :

### III.2.3.4.2.3 : Les différents engrenages de BM :

Dans la figure ce dessus une représentation en 3D du les engrenages de BM



FigIII.31 Les différents engrenages de BM

### III.2.3.4.2.4 : L'outil final (Pince) :

Dans la figure ce dessus une représentation en 3D de l'outil final de BM :



Fig.III.32 L'outil final (pince) du BM

### **III.3 : Partie 2 : Réalisation pratique**

#### **III.3.1 : Introduction :**

Dans cette partie de notre travail nous allons voir les différents éléments constitutifs du bras manipulateur et le tapis roulant et comment les assembler. Nous allons également faire des tests afin et voir son fonctionnement.

#### **III.3.2 : Structure mécanique du bras manipulateur :**

Nous avons opté pour plastique en raison de sa disponibilité et sa poids léger. Nous avons imprimé une structure mécanique conformément à un modèle à quatre degrés de liberté.

#### **III.3.3 : Réalisation :**

En à utiliser l'imprimant 3D Creality 'CR-10 ' pour réaléser notre BM



**III.33.** Imprimant 3D creality "CR-10"

### III.3.3.1 : Différentes parties du robot

Le BM est constitué de plusieurs parties dont toutes les articulations sont rotoïdes.

#### III.3.3.1.1 : La base :

Elle est composée de deux pièces (A) et (B), nous les avons reliés à l'aide de vis de rotation d'une hauteur de 5cm et un engrenage.

La pièce (A) a été imprimée de telle manière à avoir un position pour l'installer du moteur pas à pas 28byj-48, à l'aide des vis.

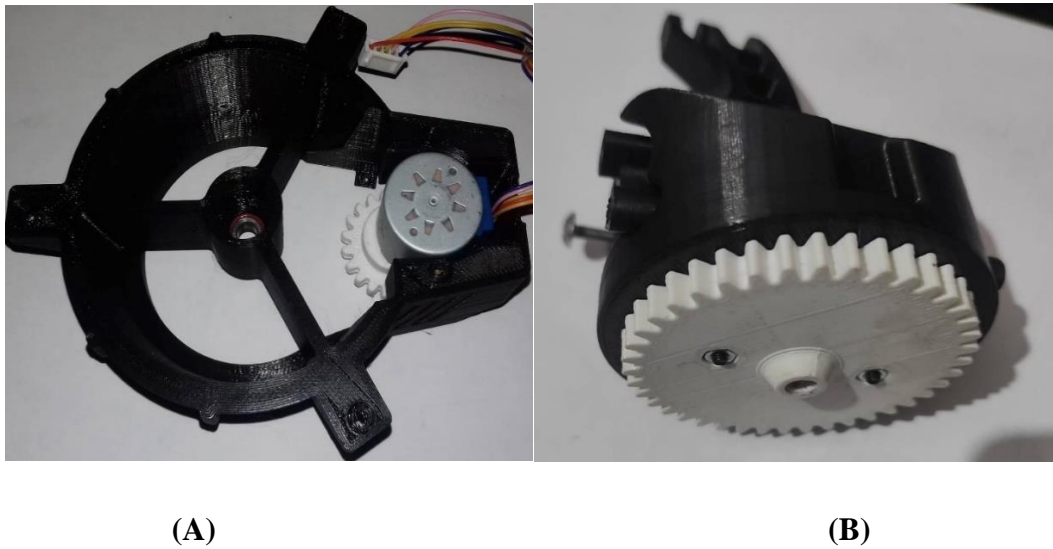


Fig.III.34. La Vue de dessus et de face de la base

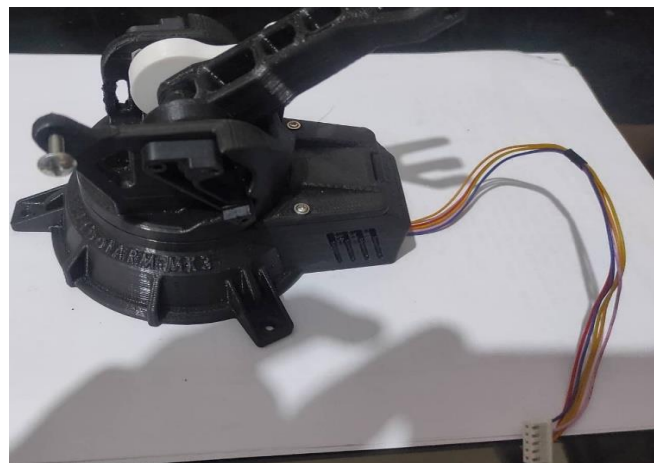


Fig.III.35. Vue de dessus de la base

### III.3.3.1.2 : Les corps de bras :

C'est un segment fait en plastique en relié à au servomoteur Mg90s implanté sur la coté du la partie supérieure de la base, la pièce a été imprimé de telle manière à avoir une ouverture pour le passage du servomoteur Mg90s sur ce segment de manière à ce qu'il soit stable



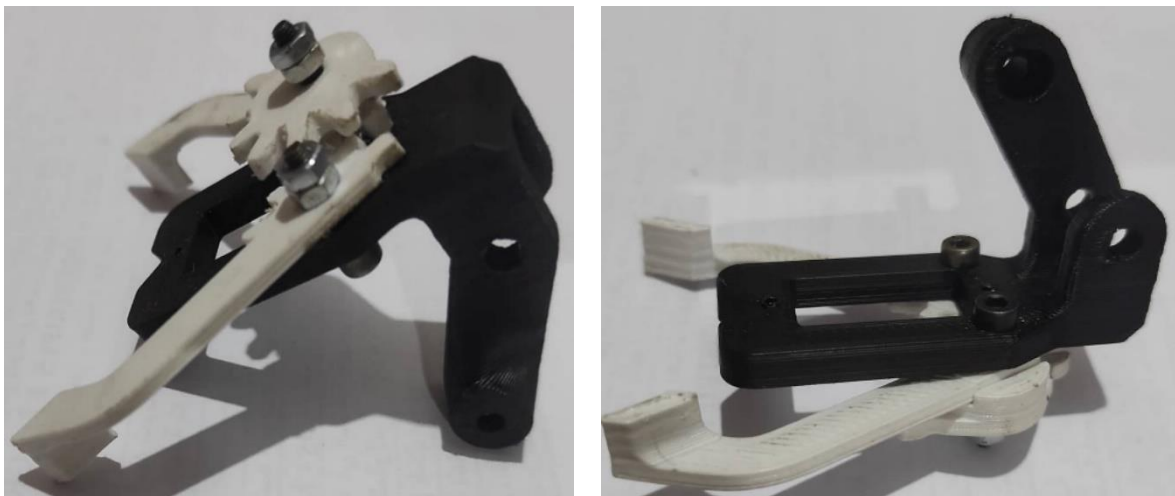
**Fig.III.36.** Les différents parties de ceps du bras



**Fig.III.37.** Vue de dessus du corps du bras placé sur la base

### **III.3.3.1.3 : Le pince :**

C'est une pince qui est fabriquée avec du plastique, elle est composée de deux doigts mobiles doté d'un servomoteur Mg90s, son rôle est de saisir l'objet désiré.



**Fig.III.38** Vue de dessous de la pince

### III.3.3.2 : Assemblage complet du bras manipulateur :

Après avoir cité les différentes parties du bras manipulateur, nous allons les assembler pour avoir un bras manipulateur complet, la figure ci-dessous le montre.



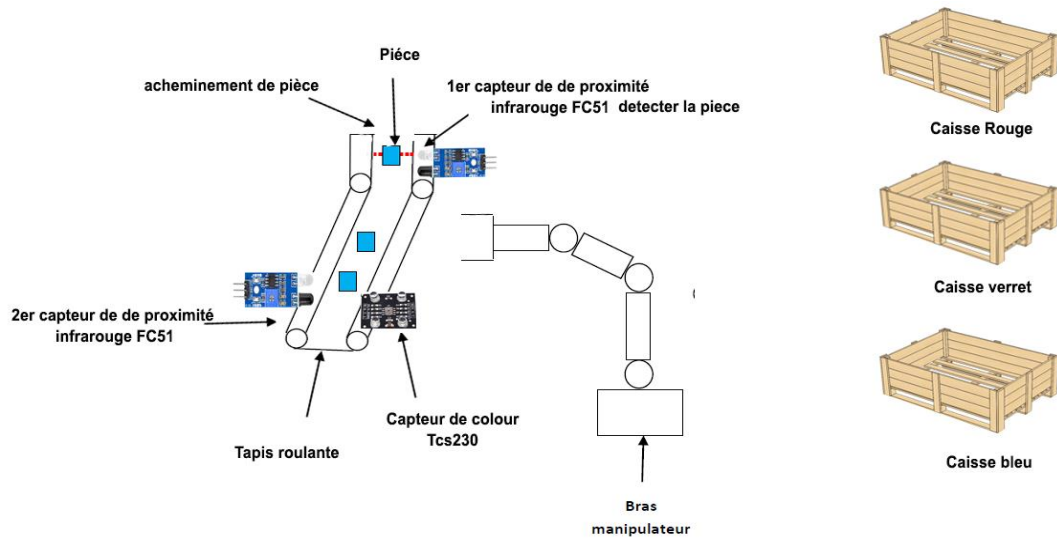
Fig.III.39 : Assemblage complet du bras manipulateur

### III.3.4 : Réalisation de tapis roulante :

### III.4 : Travail avec le bras manipulateur :

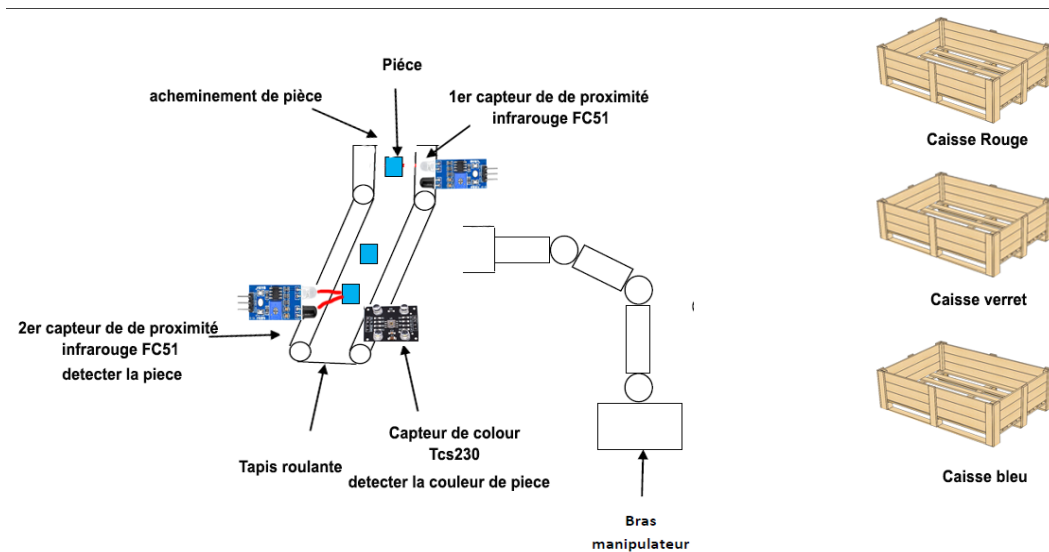
Dans ce projet, nous avons conçu un robot manipulateur basé sur Arduino. Le travail du projet est assez simple: détecter les pièces et sa couleur et après décharge chaque pièce à partir de sa couleur

Nous avons besoin de capteurs pour détecter les pièces . Pour la logique de détection de pièces , nous avons utilisé deux capteurs IR, qui se composent d'une LED IR et d'une photodiode. Ils sont placés de manière avant-arrière , c'est à dire. un dans l'avant de et l'autre en arrière , de sorte que lorsqu'ils détectent la pièce réfléchissante, la lumière émise par la LED IR sera détectée par la photodiode. pour la logique de détection de couleur La lumière de plusieurs couleurs (rouge, verte et bleue) est envoyée sur l'objet à détecter qui la réfléchit. Le capteur de couleur calcule les parts de valeur de couleur du faisceau renvoyé et les compare aux valeurs de couleur de référence réglées

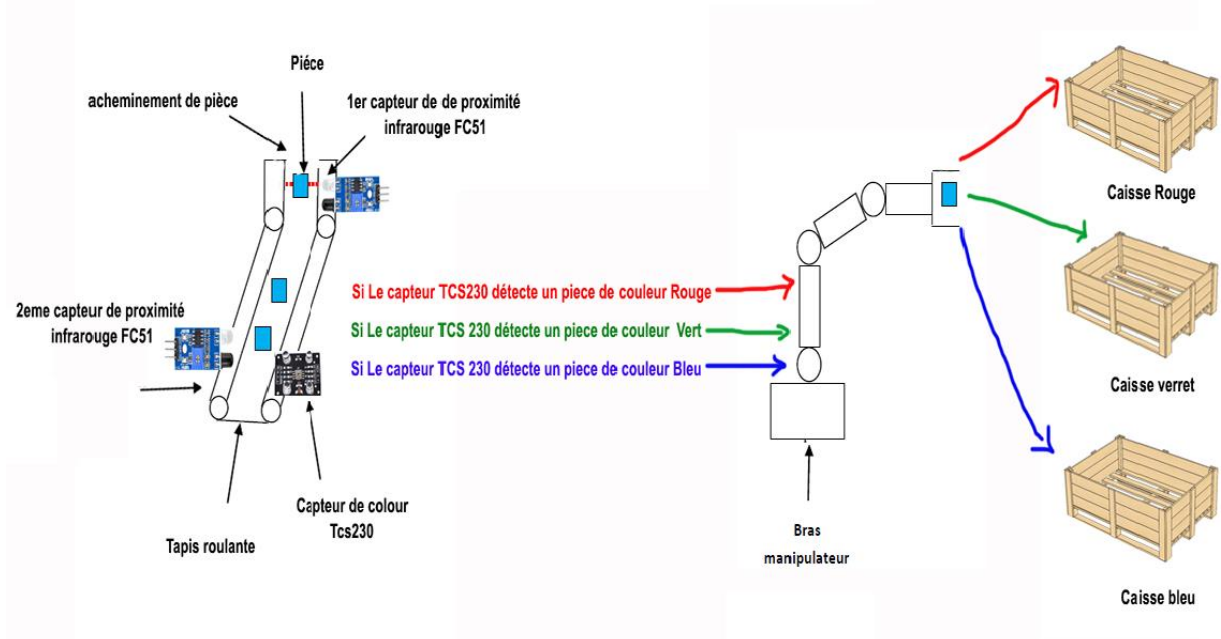


**Fig.III.40** 1<sup>er</sup> Capteur IR détecter la pièce

En utilisant le même principe, nous allons placer les capteurs infrarouges sur le tapis roulante, l'un à l'avant et l'autre à l'arrière. La configuration est illustrée dans l'image ci-dessous. Lorsque la pièce est placée sur le tapis roulante, elle est détectée par le premier capteur, l'Arduino Méga détecte ce changement, il envoie donc une commande au moteur du tapis roulante pour qu'il fonctionne et déplace la pièce jusqu'à son extrémité, où les pièces sont détectées à nouveau par le deuxième capteur, et l'Arduino envoie un signal d'arrêt pour déplacer le tapis roulante et en même temps le capteur couleur Tcs230 en découvrant la couleur de la pièce. Là où l'Arduino envoie un signal de mouvement au bras de l'illuminateur, qui se déplace selon les angles programmés dessus, il attrape donc la pièce et la porte jusqu'à la case de sa couleur.



**Fig.III.41** 2eme capteur détecte la pièce et capteur de couleur détecte La couleur de pièce



**Fig.III.42** La fonctionnment de BM quand détectent la couleur de pièces

### III.5 Le code :

```

#define s0 22
#define s1 23
#define s2 24
#define s3 25
#define out 26
#define L1 28
#define L2 30
#define L3 29
const byte IN1=44;
const byte IN2=45;
#define ir 43
int data=0;
int rouge=0;
int bleu=0;
int vert=0;
int autre=0;
int pos=0;
#include <Servo.h>
#include <Stepper.h>
Servo monservo;
Servo monservo1;
Servo monservo2;

```

```

Stepper monMoteur (2048,8,10,9,11);
Stepper monMoteur1 (2048,4,6,5,7);
void setup() {
  pinMode(s0,OUTPUT);
  pinMode(s1,OUTPUT);
  pinMode(s2,OUTPUT);
  pinMode(s3,OUTPUT);
  pinMode(out,INPUT);
  pinMode(IN1,INPUT);
  pinMode(IN2,INPUT);
  pinMode(L1,OUTPUT);
  pinMode(L2,OUTPUT);
  pinMode(L3,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  digitalWrite(s0,HIGH);
  digitalWrite(s1,LOW);
  monservo.attach(38);
  monservo1.attach(40);
  monservo2.attach(32);
  monMoteur.setSpeed(9);
  monMoteur1.setSpeed(9);
  pinMode(ir,INPUT);
  Serial.begin(9600);

}

void loop( ) {

  monMoteur1.step(1000);
  if(digitalRead(ir)==LOW ){

  /*******calibrage Vert*****
  digitalWrite(s2,HIGH);
  digitalWrite(s3,HIGH);
  vert=pulseIn(out,LOW);
  Serial.print("vert data= ");
  Serial.print(vert);
  Serial.print(" ");
  delay(20);
  /*******calibrage Bleu*****/
  digitalWrite(s2,LOW);
  digitalWrite(s3,HIGH);
  bleu=pulseIn(out,LOW);

```

```

Serial.print("bleu data= ");
Serial.print(bleu);
Serial.print(" ");
delay(20);
//*****calibrage Rouge*****/
digitalWrite(s2,LOW);
digitalWrite(s3,LOW);
rouge=pulseIn (out,LOW);
Serial.print("Rouge data= ");
Serial.print(rouge);
Serial.print(" ");
delay(20);
//*****calibrage red*****
digitalWrite(s2,HIGH);
digitalWrite(s3,LOW);
autre=pulseIn(out,LOW);
Serial.print("autre data=");
Serial.print(autre);
Serial.print(" ");
delay(20);
//***** no color *****
if (bleu < 20){
  Serial.print("no color=");

}
//***** Rouge *****
else if (rouge < vert && rouge < bleu && bleu < 100 ){
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo2.write(180);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);
monservo1.write(0);
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monservo2.write(20);
delay(1000);
monMoteur.step(1000);
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);

```

```

monservo1.write(0);
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monMoteur.step(-1000);
Serial.print("red color is here= ");
digitalWrite(L3,HIGH);
}
//***** Bleu *****//
else if (bleu < vert && bleu < rouge && bleu > 7 && bleu < 190 ) {
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo2.write(180);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);
monservo1.write(0);
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monservo2.write(20);
delay(1000);
monMoteur.step(1500);
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);
monservo1.write(0);
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monMoteur.step(-1500);
Serial.print("bleu color is here= ");
digitalWrite(L2,HIGH);
}
//***** Vert *****
else if (vert < rouge && vert < bleu && bleu >70 && bleu < 190 ) {
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo2.write(180);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);
monservo1.write(0);

```

```
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monservo2.write(20);
delay(1000);
monMoteur.step(2000);
monservo.write(20);
delay(1000);
monservo1.write(50);
delay(1000);
monservo1.write(0);
delay(1000);
monservo.write(180);
delay(1000);
monMoteur.step(-2000);
Serial.print("vert color is here= ");
digitalWrite(L1,HIGH);
}
}
}
```

### **III.6. Remarques**

#### **III.7. Utilisations du bras manipulateur dans le cas de notre projet :**

- Il est utilisé dans les usines de l'industrie alimentaire, où il aide à séparer les produits en fonction de leur couleur de manière automatique.
- Il est utilisé dans l'industrie du recyclage des déchets, en séparant les déchets selon leur couleur.
- Il est utilisé dans les fermes intelligentes, où il fonctionne pour connaître la maturité des fruits et les cueillir en fonction de leur couleur.

### **III.8 : Conclusion**

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

## Conclusion générale

Les bras manipulateurs sont souvent utilisés pour les processus d'automatisation dans les industries, les applications militaires et les applications grand public. Ils sont très utiles car ils peuvent fonctionner sans surveillance, c'est à dire. ils agissent comme des robots à direction automatique, avec des fonctionnalités supplémentaires telles que la détection des pièces et détection des couleurs

Le travail effectué dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la robotique et l'automatisme. Il consiste en conception, réalisation et commande de bras manipulateur , Ce travail s'est articulé autour de trois chapitres, dans un premier temps nous avons présenté des généralités sur la robotique et l'automatisme et les différents domaines d'applications des deux.

Ensuite dans la deuxième chapitre Sur le plan théorique, nous avons abordé la modélisation des moteur à courant continu et la modélisation de bras manipulateur en appliquant la convention de DENAVIT-HATENBERG pour le calcul du modèle géométrique directe et le modèle géométrique inverse a été utilisé pour effectuer des tâches dans l'espace opérationnel du bras manipulateur que nous avons réalisé

Dans la troisième chapitre on a dans la première partie ( Conception ), nous avons étudié de manière détaillée toute la partie matérielle (HARDWAR) où nous avons décrit les critères du choix de la carte programmable à adopter pour notre système, c'était la carte Arduino. Ensuite nous avons présenté tous les composants utilisés.

Ensuite nous avons présenté une description théorique des composants utilisés et de leurs emplacements, nous avons vu que les capteurs jouent un rôle important pour détecter la pièce et sa couleur , ce qui permet au bras manipulateur de déchargé parfaitement la pièce selon sa couleur.

Ensuite nous avons présenté tous les logiciels (SOFTWARE) qu'on a utilisé ; le logiciel Fritzing pour simulation électrique de notre projet et on a utilisé le logiciel blender pour modifier et imprimé le partie de le bras manipulateur et aussi on a utilisé le logiciel Arduino IDE pour développer le programme du commande de notre bras manipulateur

Dans la deuxième partie de la réalisation, nous avons imprimé les composants et les pièces du bras manipulateur à l'aide d'une imprimante 3D, et après avoir obtenu les pièces requises, nous avons installé les différentes pièces pour former le bras manipulateur, puis nous l'avons connecté aux moteurs qui contrôlent leurs mouvements et aux capteurs qui déterminent son rôle, avec le reste des composants de notre projet. Ensuite dans la dernière étape nous avons téléchargé notre programme dans la carte Arduino ce qui nous a permis d'atteindre l'objectif de ce projet de fin d'études

Comme travail futur, nous envisagerons d'améliorer les performances de l'application en introduisant, d'autres capteurs de calibrage plus sophistiqués, ainsi d'utiliser l'intelligence artificielle pour améliore encore mieux la détection de la pièce et sa couleur, d'introduire un réseau de communication sans fil pour se connecter à un réseau local via un module Ethernet ou pour communiquer un autre robot. Ainsi que la minimisation d'énergie pour un fonctionnement plus durable, tout en réduisant le coût dans le but d'avoir une application réalisable dans l'industrie.

## Référence

- [1] Généralités sur les robots manipulateurs - Chelly Nizar
- [2] Ait Dahmane Kahina Ait Ziane Meziane, “*Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur Commandé par API*”. Mémoire de Master, Faculté des Sciences et de la Technologie. Université de KHEMIS MILIANA, 2015.
- [3] EYRAUD, Charles-Henri. « Horloges astronomiques au tournant du XVIIIe siècle : de l'à-peu-près à la précision ». Thèse de doctorat. Lyon 2, 2004.
- [4] Official website IFR INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS.
- [5] Fancu. Introduction à la Robotique. [En ligne]. [Consulté le : 09 septembre 2019]. Disponible sur : <http://eduscol.education.fr>
- [6] ISO (International Standard Organization), 1947.
- [7] [https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/master\\_Chaal.pdf](https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/master_Chaal.pdf)
- [8] LAURENT Guillaume, CHAILLET Nicolas « Robotique industrielle » Cours, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2017.
- [9] R. Gourdeau, “*ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs*”, Département de génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010.
- [10] Robotique\_cours (ensta-bretagne.fr)
- [11] BOIMOND, Jean-Louis. « ROBOTIQUE » Cours, ISTIA, Université Angers, 2017.
- [12] W. Khalil et E. Dombre “*Modélisation identification et commande des robots*”, 2e éd. Hermès Sciences, Paris, 1999.
- [13] Dalmeç. Caractéristiques techniques des manipulateurs pneumatiques série artner EQUO. [En ligne]. [Consulté le : 11 septembre 2019] Disponible sur : <http://www.dalmeç.com/fr/manipulateurpartner-equo/>
- [14] <https://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-manipulateur-industriel/>
- [15] Digital art and innovation. L'art s'empare des robots industriels. [En ligne]. [Consulté le : 11 septembre 2019] Disponible sur : [http://media.digitalarti.com/fr/blog/digitalarti\\_mag/lart\\_pour\\_robots\\_industriels](http://media.digitalarti.com/fr/blog/digitalarti_mag/lart_pour_robots_industriels)

- [16] S. Ramzy et S. Nasser Eddine, “*Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un PC*”, mémoire de Master. Département de génie électrique 54 option micro-informatique et instrumentation. Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 2010.
- [17] LE BARS Fabrice « Analyse par intervalles pour la localisation et la cartographie simultanées ; Application à la robotique sous-marine », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, 23 novembre 2011.
- [18] J. Graham, “*CES 2017: Cars, robots are expected to star*”. USA TODAY, 2017.
- [19] RASHIDIFAR, Mohammad Amin, RASHIDIFAR, Ali Amin, et AHMADI, Darvish. « Modeling and Control of 5DOF Robot Arm Using Fuzzy Logic Supervisory Control », Article, vol. 2, no 2, 2089-4856, Janvier 2013, International Journal of Robotics and Automation (IJRA).
- [20] CRAIG, John J. « Introduction to robotics: mechanics and control », Pearson Education International, Livre, 2009.
- [21] E. Dombre, *Analyse et modélisation des robots manipulateurs*, 2ème éd. Hermès Sciences, France, 2001.
- [22] GANGLOFF Jacques « Cours de Robotique », Cours, ENSPS 3A Master ISTI, 2018.
- [23] ANGELES Jorge « Fundamentals of robotic mechanical systems », Springer, Livre, 2002.
- [24] R. Gourdeau, “*ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs*”, Département de génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010
- [25] H. Rabouhi “Polycopié de cours sur la Mécanique du point”, Université A. MIRABejaia.2014
- [26] Eléments de Robotique Université Blaise Pascal T. Château 2012/2013
- [27] S. BORSALI. “ Polycopié de cours Modélisation des Robots”. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2012.
- [28] W. Khalil, E. Dombre “Modeling Identification and Control of Robots”, Butterworth, Heinemann, 2004.
- [29] M. A. Rashidifar, A. A. Rashidifar, D. Ahmadi, “Modeling and Control of 5 DOF Robots Arm Using Fuzzy Logic Supervisory Control”, IJRA, Vol. 2, n° 2, p. 56-68, Jun 2013.
- [30] C. L. Philips et R. D. Harbor, “Feedback Control Systems”: Prentice-Hall, 2000.
- [31] J.J.Crage. Introduction to Robotics Mechanics and Control, 3e éd : Prentice Hall, 2005.

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

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

[34] BOUQUET Frédéric, BOBROFF Julien « Microcontrôleur arduino », Cours, Université Paris Sud, printemps 2015.

[35] « Arduino Mega » dans Arduino. [En ligne]. Disponible <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega>.

[36] B. Lionel, Mécatronique cours avec exercices corrigés, Paris 5 me Laromiguière, 75005 : Dunod, 2016.

[37] << MG90S Servomoteur Datasheet >> dans electronicoscaldas. [En ligne] .Disponible [https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG90S\\_Tower-Pro.pdf](https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG90S_Tower-Pro.pdf)

[38] Les actionneur << Etude et principe de fonctionnement des moteurs pas à pas... >> fiche de cours Université de tlemcen

<http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11743/1/Ms.ELN.Chigango%2BMapuranga.pdf>

[39] << moteur pas a pas 28BYJ-48 >> dans hwlibre [En ligne]. Disponible sur : <https://www.hwlibre.com/fr/28byj-48/>

[40] << Datasheet de moteur pas a pas 28BYJ-48 >> dans digikey [EN ligne]. Disponible <https://www.digikey.fr/fr/datasheets/mikroelektronika/mikroelektronika-step-motor-5v-28byj48-datasheet>

[41] << Module Driver ULN2003 >> dans Volta [En ligne] . Disponible <https://volta.ma/produit/module-driver-uln2003-moteur-pas-a-pas/>

[42] J. J. Cragg "Introduction to Robotics Mechanics and Control", 3<sup>e</sup>éd: Prentice Hall, 2005.

[43] << Capteur de proximité Infrarouge - FC51 >> [Consulté le : 24 mai 2017]. Disponible sur : <https://www.mataucarre.fr/index.php/2017/05/24/capteur-de-proximite-infra-rouge-fc-51-arduino/>

[44] << Schéma électrique du Capteur de proximité Infrarouge - FC51 >> [En Ligne]. Disponible sur : <https://www.fabriqueurs.com/capteur-infrarouge-pour-arduino/>

[45] << TCS230 COLOR RECOGNITION MODULE >> [En Ligne]. Disponible sur : [http://www.energiazero.org/arduino\\_sensori/tcs230\\_color\\_sensor.pdf](http://www.energiazero.org/arduino_sensori/tcs230_color_sensor.pdf)

[46] << fonctionnement de capteur de couleur tsc230 >> [En Ligne].Disponible sur <https://fr.fmuser.net/content/?20984.html>

[47] <<Schéma électrique du Capteur de couleur Tcs230 >> [En Ligne].Disponible sur <https://acoptex.com/project/2997/basics-project-078a-tcs230-or-tcs3200-color-sensor-at-lex-c/>

[48] << Fils de connexion >> [En Ligne].Disponible sur <https://arduino103.blogspot.com/2018/05/realiser-ses-propres-raccordements-avec.html>

[49] << LA LED >> [En Ligne].Disponible sur <https://www.abavala.com/quest-ce-quune-led/>

[50] "Push buttons and much more". thebuilderssupply.com. Retrieved 11 April 2013.

[51] Les conducteurs ohmiques : [Phrase mnémotechnique \[archive\]](#), sur le site des [sciences du collège Crochepierre \[archive\]](#) (consulté le 25 octobre 2016)

[52] B. Lionel, Mécatronique cours avec exercices corrigés, Dunod, Paris 5me Laromiguière 75005, 2016.

[53] (DE) Thomas Gläser, Markus et Philipp Jaritz Sackl, Hardware-Hacking: homme Alors baut einen Tentakel-Roboter für 100 Euro, en der Spiegel, 13 septembre 2009..

[54] Djebarni Alaeddine“ Etude et conception d’un bras de robot ”. Mémoire de Master, faculté d'electromécanique. Université Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy Bordj Bou Arréridj ,2021

[55] Hess Roland et [Ton Roosendaal](#), The Essential Blender : Guide To 3D Creation With The Open Source Suite Blender, [No Starch Press](#), septembre 2007

[56] << les fichiers stl 3D de bras manipulateur >> [En Ligne].Disponible sur <https://www.thingiverse.com/thing:2838859/files>