

Republique Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Aboubakr Belkaïd  
Tlemcen  
Faculté de Technologie

Thèse  
Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Spécialité :

AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

# Etude et réalisation d'un bras humanoïde

---

Par :

Mezouari Rahma  
Lasri Hizia Riham

Soutenue en septembre 2020 devant le jury composé de :

Mr Yacoubi Boumediene	MAA	Président	Université de Tlemcen
Mr Benyahia Boumediene	MCA	Examinateur	Université de Tlemcen
Mr Choukri Bensalah	MCB	Encadreur	Université de Tlemcen

## Remerciements

*En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces Longue années d'étude.*

*Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*Nous voudrions exprimer notre gratitude à mon encadreur de mémoire, M. Bensalah Choukri. Je le remercie de m'avoir supervisé, guidé, aidé et conseillé.*

*nous tenons à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants qui, par leurs paroles et leurs conseils, ont guidé mes réflexions au cours de mes recherches.*

*Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*À tous, nous leur offrons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.*

## Résumé

La main robotique humanoïde trouve sa principale application dans la robotique et les prothèses. Avec l'émergence de la technologie d'impression 3D, la plupart des parties de la main robotique peuvent être facilement imprimées en 3D. Un utilisateur moyen sans aucune connaissance technique peut l'effectuer.

Le but de ce projet est de reproduire la plupart des fonctionnalités d'une main robotisée avancée en utilisant des pièces imprimées en 3D. En dernier lieu, diverses tâches ont été planifiées, implémentées à l'aide du module arduino puis exécutées par le bras .

## Abstract

The humanoid robotic hand finds its main application in robotics and prostheses. With the emergence of 3D printing technology, most parts of the robotic hand can be easily printed in 3D, which can be done by the average user without any technical knowledge.

The aim of this project is to reproduce most of the functionality of an advanced robotic hand using 3D printed parts. Finally, various tasks were planned, implemented using the arduino module and then executed by the arm.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Généralités sur la robotique et les humanoïdes</b>	<b>9</b>
1.1	Introduction . . . . .	9
1.2	Définition . . . . .	9
1.3	Contexte général et problématique . . . . .	10
1.4	Le bras humain . . . . .	10
1.5	Mains robotiques . . . . .	11
1.5.1	Les deux principaux axes de recherche sur les main robotiques .	11
1.5.2	Nomenclature des mains . . . . .	12
1.5.3	Histoire des prothèses . . . . .	12
1.6	Mécanismes d'orientation de la main . . . . .	13
1.6.1	Mécanisme de l'avant-bras . . . . .	14
1.6.2	Caractéristiques du modèle biomécanique à imiter par le mécanisme	16
1.6.3	Mécanisme de la main . . . . .	17
1.7	Conclusion . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Modélisation géométrique et cinématique</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Généralités sur la sélection de la loi de commande . . . . .	19
2.3	Degré de libertés-Architecture . . . . .	20
2.3.1	Liaison . . . . .	20
2.3.2	Mécanismes . . . . .	21
2.3.3	Morphologie des robots manipulateurs . . . . .	23
2.4	Rappel sur les transformations . . . . .	25
2.5	Convention de Denavit-Hartenberg . . . . .	26
2.6	Modélisation géométrique . . . . .	26
2.6.1	Modélisation géométrique directe . . . . .	26
2.6.2	Modélisation géométrique inverse . . . . .	27
2.7	Modélisation cinématique . . . . .	27
2.7.1	Modélisation cinématique directe . . . . .	27
2.7.2	La Jacobienne analytique . . . . .	28
2.7.3	Jacobienne géométrique . . . . .	28
2.7.4	Modélisation cinématique inverse . . . . .	28
2.8	La tâche additionnelle . . . . .	29
2.9	Génération de mouvement . . . . .	30
2.10	Conclusion . . . . .	31

<b>3</b>	<b>Conception mécanique</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction . . . . .	33
3.2	Procédés d'impression . . . . .	33
3.3	La main . . . . .	34
3.3.1	Dimensions de la main (cm) . . . . .	35
3.3.2	Dimensions des doigts (cm) . . . . .	35
3.3.3	Processus de fabrication et d'assemblage . . . . .	35
3.3.4	Force exercée sur les câbles et les emplacements . . . . .	36
3.4	L'avant-bras (Boucle PS) . . . . .	37
3.4.1	Dimensions de l'avant-bras (cm) . . . . .	37
3.4.2	Processus de fabrication et d'assemblage . . . . .	37
3.5	Bicep . . . . .	41
3.5.1	Processus de fabrication et d'assemblage . . . . .	41
3.6	Epaule . . . . .	44
3.6.1	Processus de fabrication et d'assemblage . . . . .	45
3.7	Assemblage de bras complet . . . . .	47
3.8	Conclusion . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Architecture du système et programmation</b>	<b>48</b>
4.1	Introduction . . . . .	48
4.2	Le matériel utilisé . . . . .	48
4.2.1	Arduino Uno . . . . .	48
4.2.2	MG996R Couple élevé Servo à double roulement à billes pour engrenage métallique . . .	50
4.2.3	Joystick Arduino PS2 . . . . .	51
4.2.4	Le programme de bras robotique . . . . .	53
4.3	Conclusion . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Expérimentation et résultat</b>	<b>58</b>
5.1	Introduction . . . . .	58
5.2	Modèle cinématique de la main . . . . .	58
5.2.1	Convention Denavit-Hartenberg . . . . .	59
5.2.2	Cinématique direct . . . . .	60
5.3	Modèle cinématique des membres supérieurs . . . . .	66
5.3.1	Convention de Denavit-Hartenberg . . . . .	66
5.4	Modèle simulé de la main . . . . .	68
5.5	Les mouvement des membres supérieurs . . . . .	70
5.6	Les différents types de mouvements de la main . . . . .	70
5.7	Conclusion . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Programme de la main et poignet</b>	<b>78</b>
<b>B</b>	<b>Programme des membres supérieurs</b>	<b>79</b>

# Table des figures

1.1	Les os des membres supérieurs . . . . .	11
1.2	Les deux principaux axes de recherche sur les main robotiques . . . . .	12
1.3	Nomenclature des articulations et des os de la main . . . . .	12
1.4	Une frise historique des prothèses de la société Ottobock . . . . .	13
1.5	Mouvements de l'épaule . . . . .	14
1.6	Structure osseuse et mécanisme du coude . . . . .	14
1.7	Mouvement de flexion/extension du coude . . . . .	15
1.8	Mouvement de pronation/supination . . . . .	15
1.9	Mouvements du poignet . . . . .	15
1.10	Modèle biomécanique à imiter par le mécanisme . . . . .	16
1.11	Cinématique simplifiée du bras humain . . . . .	17
1.12	Modèle cinématique de la main droite . . . . .	17
2.1	exemples des Chaînes simples ouvertes . . . . .	22
2.2	exemples des Chaînes complexes . . . . .	22
2.3	Les trois angles d'Euler . . . . .	25
2.4	Autre présentation . . . . .	26
2.5	Génération de mouvement dans l'espace articulaire . . . . .	30
2.6	Génération de mouvement dans l'espace opérattionnel . . . . .	31
3.1	Pièce imprimer eb 3D . . . . .	34
3.2	La main en 3D . . . . .	34
3.3	Impression 3D des pièces . . . . .	35
3.4	Assemblage de la main . . . . .	36
3.5	Le pouce . . . . .	37
3.6	L'avant-bras en 3D . . . . .	37
3.7	L'assemblage de l'avant-bras . . . . .	38
3.8	Poulie . . . . .	38
3.9	Placement des servomoteurs . . . . .	39
3.10	Système à engrenages . . . . .	39
3.11	Mécanisme de rotation du poignet . . . . .	39
3.12	Placement de moteur du poignet . . . . .	40
3.13	Couplage de le poignet avec la main . . . . .	40
3.14	Couplage de le poignet avec la main . . . . .	40
3.15	Avant-bras fermé après l'accouplement des tendons et des servomoteurs	41
3.16	Bicep en 3D . . . . .	41
3.17	Engrenage à vis sans fin . . . . .	42
3.18	Servomoteur responsable du mouvement du coude . . . . .	42

3.19	Bicep . . . . .	42
3.20	Assemblage de bicep . . . . .	42
3.21	Relier biceps et avant bras en 3D . . . . .	43
3.22	Relier biceps et avant bras . . . . .	43
3.23	Système à engrenages pour aider le mouvement de coude . . . . .	43
3.24	Souvertures du biceps . . . . .	44
3.25	L'accouplement de la main, du poignet , l'avant-bras et bicep . . . . .	44
3.26	Epaule en 3D . . . . .	45
3.27	Mécanisme à vis sans fin pour la rotation de l'épaule . . . . .	45
3.28	Servo-moteur attaché à côté de l'épaule . . . . .	46
3.29	Epaule . . . . .	46
3.30	Le bras robotique . . . . .	47
4.1	Arduino uno . . . . .	48
4.2	Arduino Uno à ATmega328 Pin Mapping . . . . .	49
4.3	Arduino IDE (Integrated Development Environment) . . . . .	49
4.4	Modèle Arduino Uno 2D . . . . .	50
4.5	Servomoteur MG996R . . . . .	50
4.6	Joystick Arduino PS2 . . . . .	51
4.7	Brochage du joystick Arduino PS2 . . . . .	52
4.8	Schéma du joystick Arduino PS2 . . . . .	52
4.9	Orientation de la sortie du joystick Arduino PS2 . . . . .	53
4.10	L'organigramme de mouvement de bras . . . . .	55
4.11	Continuation de l'organigramme de mouvement du bras . . . . .	56
4.12	Continuation de l'organigramme de mouvement de bras . . . . .	56
5.1	Structurer la main humaine . . . . .	58
5.2	Prothèse cinématique complète configuration . . . . .	61
5.3	Modèle pour le pouce . . . . .	61
5.4	Modèle pour l'index et le milieu doigt . . . . .	63
5.5	Modèle pour la bague et le petit doigt . . . . .	65
5.6	Convention de Denavit-Hartenberg des membres supérieurs . . . . .	66
5.7	Modèle simulé et prothèse sans flexion . . . . .	69
5.8	Modèle et prothèse simulés avec des flexions complètes du pouce et de l'index . . . . .	69
5.9	Modèle de flexion et prothèse entièrement simulés . . . . .	70
5.10	Les mouvement des membres supérieurs . . . . .	70
5.11	Position de référence . . . . .	71
5.12	Position ouverte . . . . .	71
5.13	Position fermée . . . . .	71
5.14	Position de supination . . . . .	71
5.15	Position de pronation . . . . .	71
5.16	Position dans l'index . . . . .	71
5.17	Position de la pince à épiler . . . . .	72
5.18	Saisir différents objets . . . . .	72
5.19	(a) Dire "salut" en utilisant la main ouverte verticale . . . . .	73
5.20	(b) Signaler "ok" en utilisant l'index et le pouce . . . . .	73

5.21	(c) Signer un signal de "peace" en utilisant l'index et le milieu finger . . . . .	73
5.22	(d) Geste de pointage en utilisant l'index finger . . . . .	73
5.23	(e) Signaler l'approbation en levant le pouce . . . . .	74



# Liste des tableaux

3.1	Dimensions de la main (cm) . . . . .	35
3.2	Dimensions des doigts (cm) . . . . .	35
3.3	Dimensions de l'avant-bras (cm) . . . . .	37
5.1	Notation des articulations et des liens dans le modèle . . . . .	59
5.2	Les paramètres D-H de pouce doigt . . . . .	62
5.3	Les paramètres D-H de l'index et le milieu doigt . . . . .	63
5.4	Les paramètres D-H de la bague et le petit doigt . . . . .	65
5.5	Paramètre de D-H des membres supérieurs . . . . .	67

# Introduction générale

Tout au long de l'histoire de l'humanité, la copie de la nature a permis d'obtenir une conception optimale et de meilleures performances grâce à des conceptions qui imitent la structure et la fonction du corps humain. La robotique humanoïde a le potentiel pour être utilisée dans la robotique sociale car elle a une forme humaine similaire. Cette approche est générale et polyvalente car elle peut interagir avec les humains dans de nombreux environnements et situations différents pour accomplir de nombreuses tâches. Les robots humanoïdes devraient également avoir une géométrie, une cinématique, des capacités de détection et un comportement similaires à ceux des humains. Cela a permis de développer ces robots en tant que plateformes polyvalentes dans l'industrie du divertissement, l'industrie de la défense et pour étudier le comportement humain.

L'histoire de l'imitation de la forme humaine a commencé il y a longtemps, au 13ème siècle par Al-Jazari et au 15ème siècle par Léonard de Vinci, qui ont tous deux conçu l'automatisation humanoïde. Le premier humanoïde moderne était le WABOT-1 qui a été développé à l'université de Waseda au Japon, comme mentionné dans [1]. De nombreux chercheurs ont apporté de nombreux développements dans le domaine de la robotique humanoïde [2].

L'homme a été recherché inlassablement pour reproduire des machines qui peuvent aider ou remplacer leurs actions. Lorsqu'un homme perd une partie de son corps par accident, il finit par être gêné dans ses activités de différentes manières. Si la main est la partie du corps qui a été endommagée, le problème s'aggrave en général. En conséquence, plusieurs recherches ont été menées pour la production de prothèses qui se rapprochent de la main humaine réelle. Pour la plupart des applications du robot humanoïde, une modélisation à la fois cinématique et dynamique est nécessaire, ce qui est introduit par de nombreux chercheurs [3].

De la main robotique, la conception et la mise en œuvre de l'interface logicielle pour un contrôle intuitif de la main par l'utilisateur et une facilité d'intégration aux systèmes robotiques existants. Cette nouvelle main permettra d'imiter, de saisir de manière polyvalente, des gestes reconnaissables par l'homme, d'exercer une force contrôlée par rétroaction [4].

Motivé par le coût élevé de la main robotique humanoïde avancée, le but de ce projet est de construire une main robotique imprimée en 3D peu coûteuse qui peut reproduire autant de fonctionnalités de la main avancée, tout en minimisant le coût. Comme le projet est réalisé sous la forme d'une combinaison de projets de génie électrique et d'informatique, il est divisé en deux tâches de conception. La tâche de conception en génie électrique consiste à créer un système de capteurs et d'actionneurs électroniques pour la main robotisée. La tâche de conception en informatique consiste à créer un logiciel modulaire qui contrôlera les composants électroniques de la main robotisée à l'aide du module arduino [5].

# Chapitre 1

## Généralités sur la robotique et les humanoïdes

### 1.1 Introduction

L'homme devient central dans tout nouveau développement d'un robot humanoïde. En effet, tous deux sont amenés à interagir sous diverses formes, allant de la communication – verbale ou non – à la collaboration effective via un objet physique partagé pour la réalisation d'une tâche (déplacer une table, passer un outil ou un ustensile de cuisine...). De ce fait, les mouvements accomplis par l'être humain sont une source d'inspiration très riche pour la programmation des mouvements des robots humanoïdes et l'enrichissement de leurs capacités motrices. La comparaison entre les mouvements souples et fluides du corps humain et ceux qui sont réalisés par les plus avancés des robots humanoïdes d'aujourd'hui souligne les limites de ces derniers et mettent en perspective les grands défis qui restent à relever dans ce domaine. Par ailleurs, la constitution même de l'être humain – qui est composé d'un squelette osseux par-dessus lequel des muscles sont commandés par un cerveau recevant des informations issues de différents capteurs (yeux, oreilles, peau, oreille interne...) pour générer des ordres moteurs –, peut servir de modèle de référence pour la conception et la réalisation de robots humanoïdes. On parle alors de processus de conception et de commande bio-inspirés.

### 1.2 Définition

Le mot « robot » vient du tchèque *robota* qui signifie travail forcé. Ce mot est créé en 1920 par Karel Čapek dans sa pièce de théâtre de science-fiction, *R.U.R* (*Rossum's Universal Robots*), où les robots sont proches de ce qu'on appelle aujourd'hui des androïdes.

Le mot « humanoïde », qui provient du latin « *humanus* » signifie « ressemblant à l'Humain », et suit du suffixe grec « *-oid* » qui veut dire « comme ». (Il est différencié du mot « androïde » qui signifie « ressemblant à l'homme » au sens masculin, il est pourtant utilisé à mauvaise escient pour désigné un robot à l'image de la femme puisqu'il est le mot qui évoque le plus l'image d'une machine). Dans les œuvres de science-fiction, les robots sont des machines à l'aspect humain qui sont capable de se mouvoir, de parler et d'exécuter des opérations. Cependant aujourd'hui les robots, même s'ils se

rapprochent de cette vision futuriste, sont des machines automatiques qui ont la capacité d'effectuer des opérations précises suivant un programme fixe, modifiable et adaptable. La robotique est l'ensemble des techniques permettant la conception des robots ou de machines automatiques. Aujourd'hui, les robots sont de plus en plus présents dans notre société que se soit dans le domaine privé, industriel, médical ou militaire. Nous allons nous demander comment les robots humanoïdes permettent-ils d'effectuer des tâches humaines voire surhumaines ? Pour cela, nous nous intéresserons à l'évolution de l'humanoïde, de ses débuts jusqu'à nos jours, puis le contraste entre l'humain et l'humanoïde en étudiant l'anatomie de celui-ci et enfin les avantages et inconvénients des robots humanoïdes aujourd'hui.

### 1.3 Contexte général et problématique

En effet, les robots humanoïdes sont appelés à prendre une place de plus en plus importante dans les tâches domestiques ordinairement dédiées aux humains. Il est donc nécessaire qu'ils possèdent des organes de taille semblable de manière à pouvoir utiliser les mêmes outils que ces derniers, bref à être fonctionnels dans un milieu conçu pour les humains. De plus, cette similarité pourrait faciliter l'acceptation de ces robots par le public. Leurs mains doivent donc, en première prémisse, être physiquement comparables à celles d'un humain adulte standard. L'utilisation d'un modèle prothétique est cependant à éviter, puisqu'il n'est souvent apte à réaliser qu'un seul type de prise.

Le sous-actionnement permet évidemment d'adapter la forme de la main à l'objet lors de sa fermeture. Il faut toutefois utiliser différents modèles afin de modifier la distribution des forces ainsi que la position des doigts par rapport à la paume. Par conséquent, la deuxième prémisse pour l'élaboration d'une main sous-actionnée pour un robot humanoïde est qu'elle doit posséder un certain degré d'adaptation de sa prise en fonction de l'objet à saisir et de la tâche à effectuer.

### 1.4 Le bras humain

#### **Les os des membres supérieurs :**

Les bras sont reliés au tronc par l'épaule, qui est une articulation constituée de la clavicule et de l'omoplate, que l'on appelle la ceinture scapulaire. De l'épaule vers le bout des doigts, on retrouve les os suivants : l'humérus, le radius, le cubitus (aussi appelé ulna), les os carpiens (8 os), les os métacarpiens (5 os) et, finalement, les phalanges (14 os).

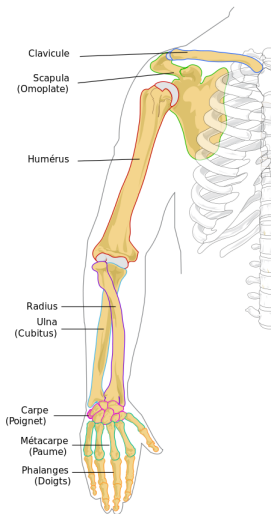


FIGURE 1.1 – Les os des membres supérieurs

La façon dont l'épaule s'articule permet au bras de bouger dans presque toutes les directions. Les mains, quant à elle, permettent la préhension d'objet. Autrement dit, le nombre élevé de petits os dans une main la rend suffisamment agile pour prendre des objets.

## 1.5 Mains robotiques

### 1.5.1 Les deux principaux axes de recherche sur les main robotiques

- Le premier axe de recherche du domaine de la robotique concerne le développement des techniques de contrôles et des stratégies d'automatisation afin d'améliorer les performances des robots et des interfaces homme-machine permettant de les utiliser.
- Le deuxième axe de recherche du domaine de la robotique concerne l'analyse, l'amélioration et la conception des mécanismes des actionneurs et des matériaux utilisés dans les robots, l'amélioration des capacités de manipulations agiles des mains robotiques. Avec les nouvelles tendances d'interaction et de coopération, les secteurs de la réhabilitation et dans l'amélioration des capacités de préhension apparaissent.

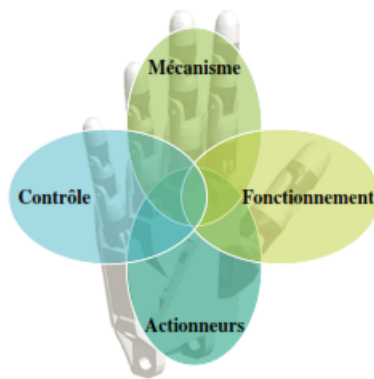


FIGURE 1.2 – Les deux principaux axes de recherche sur les main robotiques

### 1.5.2 Nomenclature des mains

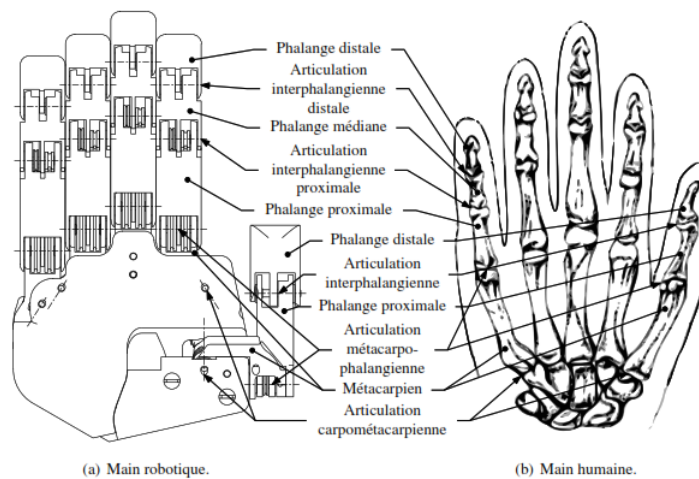


FIGURE 1.3 – Nomenclature des articulations et des os de la main

### 1.5.3 Histoire des prothèses

L'existence des prothèses date de la nuit des temps. Les premiers Hommes ayant perdu un membre ont eu recours à l'utilisation des béquilles pour maintenir leur équilibre. Les prothèses datant des égyptiens ont inspiré les grecs et les romains. Elles furent par la suite reprises au Moyen-âge, particulièrement pour la fabrication de prothèses de combats.

A la Renaissance, le développement des sciences fut à l'origine de la modernisation des prothèses. En effet c'est à cette époque que le français Amboise Paré fabrique les premières prothèses articulées en métal.

Mais c'est surtout la Révolution industrielle et les deux grandes Guerres Mondiale qui ont permis le développement du monde des prothèses et, une meilleure prise en charge des amputés puisqu'il fallait appareiller un grand nombre de blessés.

Par la suite, les prothèses ont bénéficié de toutes les dernières grandes avancées industrielles comme la mécanique et l'électronique.

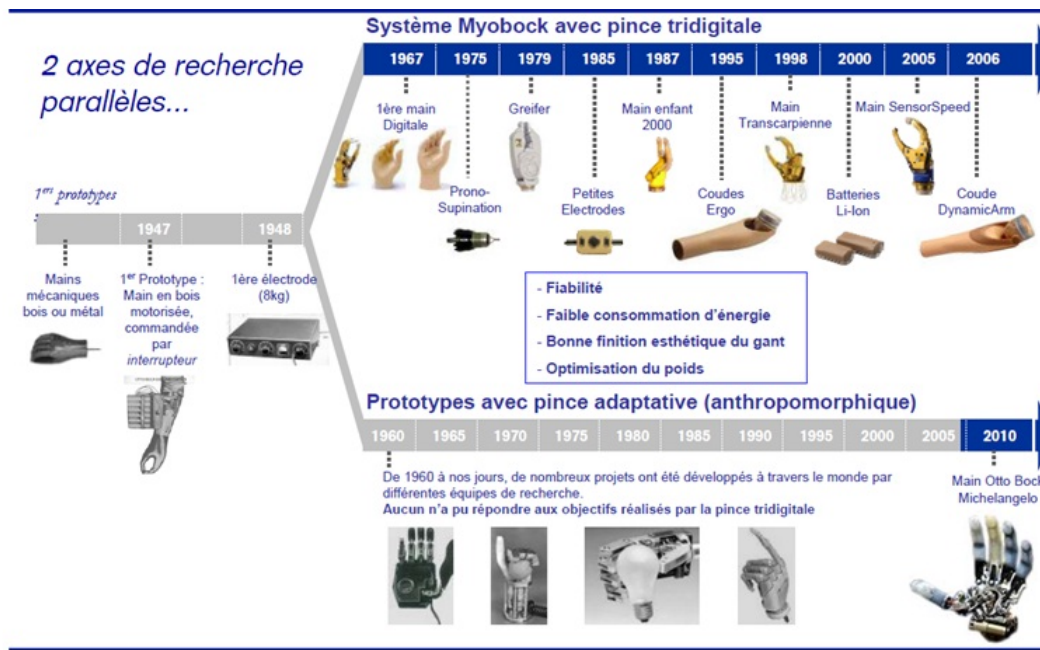


FIGURE 1.4 – Une frise historique des prothèses de la société Ottobock

## 1.6 Mécanismes d'orientation de la main

Le poignet est la structure osseuse et musculaire reliant la main à l'avant-bras et qui fixe leur orientation relative. En robotique, le poignet des robots est généralement modélisé comme un joint sphérique à trois degré de liberté pour simplifier les analyses mathématiques reliées à la cinématique. Cependant, en biomécanique, le mécanisme responsable de l'angle de roulis de la main est le plus souvent modélisé au coude produisant une rotation complète de l'avant-bras sur lui-même plutôt que de la main seulement et ce, complètement indépendamment de la FE (FLexion/Extension) du coude. Cette section présente d'abord le mécanisme responsable de la rotation de l'avant-bras, puis les mécanismes de tangage et lacet du poignet tels qu'ils sont habituellement présentés dans la littérature.

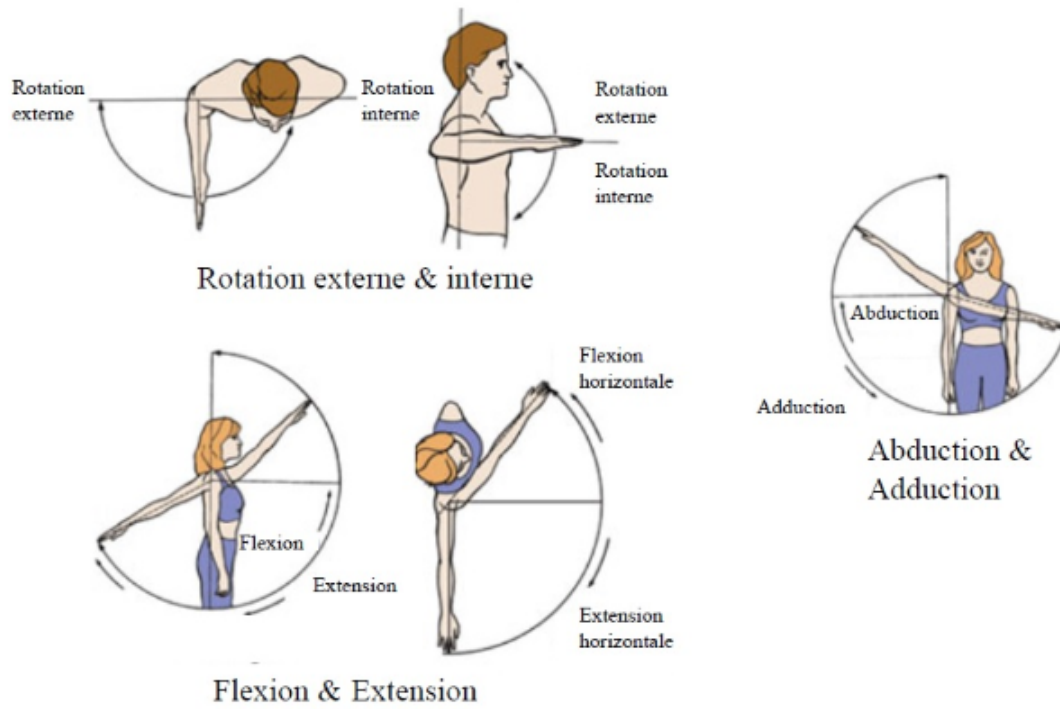


FIGURE 1.5 – Mouvements de l'épaule

### 1.6.1 Mécanisme de l'avant-bras

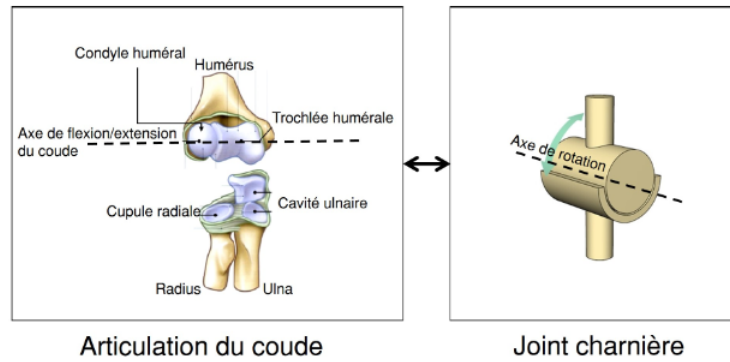


FIGURE 1.6 – Structure osseuse et mécanisme du coude



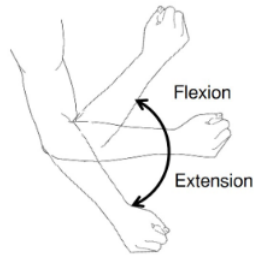


FIGURE 1.7 – Mouvement de flexion/extension du coude

Le mouvement de rotation de l'avant-bras produit par cette boucle et décrivant du même coup l'orientation de la main selon un angle de roulis est appelé le mouvement de pronation/supination (PS)

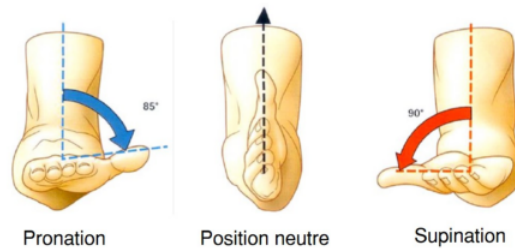


FIGURE 1.8 – Mouvement de pronation/supination

Le poignet peut orienter la main dans les trois directions de l'espace :

- les articulations radio-carpienne et médio-carpienne permettent deux degrés de liberté
- le 3<sup>ème</sup> degré de liberté additionnel au poignet est apporté par la prono-supination.

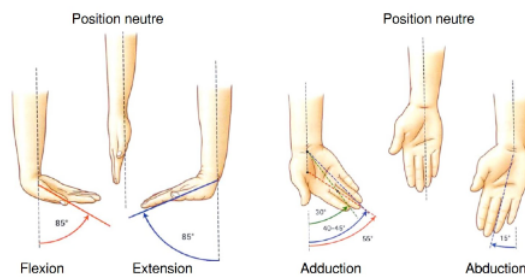


FIGURE 1.9 – Mouvements du poignet

## 1.6.2 Caractéristiques du modèle biomécanique à imiter par le mécanisme

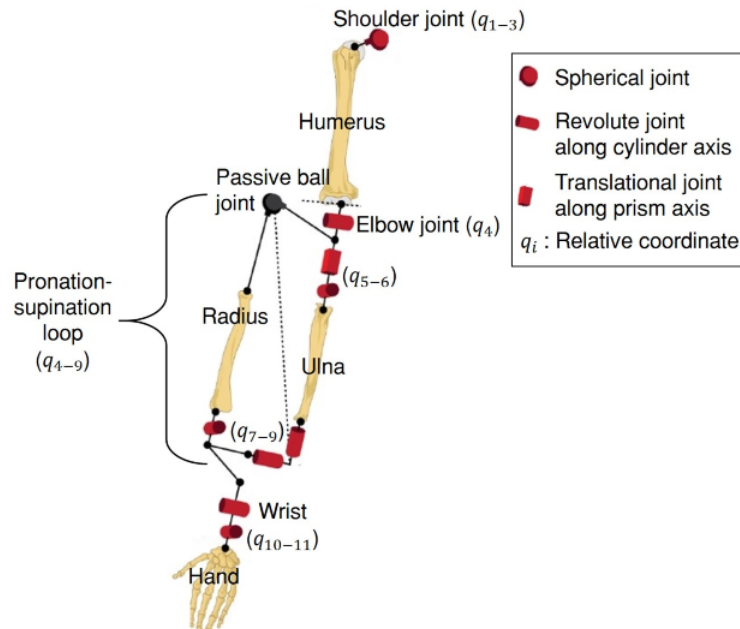


FIGURE 1.10 – Modèle biomécanique à imiter par le mécanisme

l'épaule(Shoulder)  $\mapsto$  ( $q_1$  ,  $q_2$  , $q_3$ ) Articulation sphérique idéale contrôlant l'orientation de l'épaule

Coude(Elbow)  $\mapsto$  ( $q_4$ ) Une articulation révolutionnaire pour contrôler l'extension de flexion (FE) mouvement du coude

l'avant-bras (Boucle PS)  $\mapsto$   $q_5$  (passif) Joint passif pour fermeture de boucle ,  $q_6$  (actionné) Joint tournant contrôlant l'angle de portage entre l'axe PS et l'humérus ,  $q_7$  (actionné) Joint tournant contrôlant le mouvement du PS ,  $q_8$  (passif) Joint passif pour fermeture de boucle,  $q_9$  (passif) Joint passif pour fermeture de boucle , Articulation à rotule passive Position de fermeture à trois boucles mathématique contraintes

Poignet(Wrist)  $\mapsto$   $q_{10}$  (actionné) Joint révolutionnaire contrôlant le mouvement FE de le poignet ,  $q_{11}$  (actionné) Une articulation révolutionnaire qui contrôle l'enlèvement le mouvement du poignet

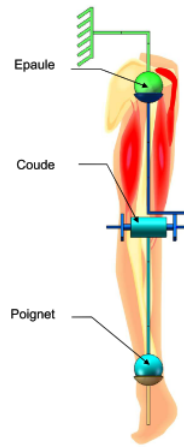
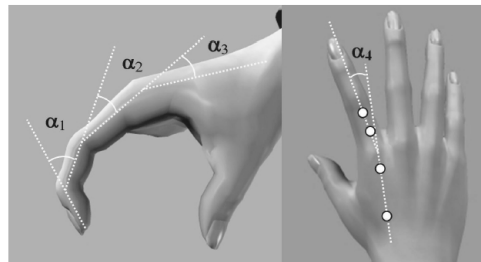


FIGURE 1.11 – Cinématique simplifiée du bras humain

### 1.6.3 Mécanisme de la main

La main est l'organe de préhension chez l'homme qui lui permet de manipuler des objets de tailles et de formes diverses et variées. Elle lui permet également d'effectuer des tâches, parfois d'une grande complexité, avec force ou avec une grande finesse. Il s'agit d'un outil d'une importance cruciale au quotidien .



Modèle cinématique de la main droite (articulation inter-phalangienne distale, *IPP* : articulation inter-phalangienne proximale, *MCP* : articulation métacarpo-phalangienne, *CMC* : articulation carpométacarpienne, *FLEX – EXT* : Flexion-extension, *ABD – ADD* : abduction-adduction, *AXIALROT* : rotation axiale).

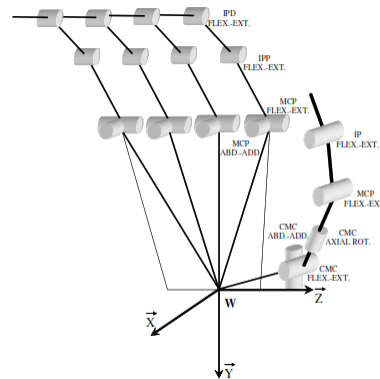


FIGURE 1.12 – Modèle cinématique de la main droite

Dans le cadre de cette étude, le modèle de la main a été modifié en tenant compte de la rotation axiale de l'articulation carpo-métacarpienne (*CMC*). Cette articulation est représentée par une articulation rotule à 3 degrés de liberté (Buchholz et Armstrong, 1992 ; Savescu et al., 2004 ; Li et Tang, 2007) afin de tenir compte de la rotation apparente due à la non orthogonalité des axes de l'articulation *CMC* (Pieron, 1973 ; Cooney et al., 1981 ; Hollister et al., 1992 ; Sancho-Bru et al., 2001 ; Sancho-Bru et al., 2003 ; Cheze et al., 2009).

## 1.7 Conclusion

La main et le cerveau sont deux éléments qui distinguent l'homme du reste du règne animal. Les évolutionnistes débattent toujours la question de savoir si la main est le résultat d'un cerveau développé ou si le cerveau est le résultat d'une main sophistiquée. Tout cela est le miroir de l'extraordinaire versatilité et complexité de la main humaine.

La main est un extraordinaire outils à 28 degrés de liberté, ayant la capacité de se régénérer, comprenant 27 os, 34 muscles et 3 groupes nerveux qui, avec l'aide de nombreux tendons, ligaments et articulations, sont orchestrés pour réaliser de nombreux mouvements grossiers mais aussi très délicats et précis.

Comme le témoignent les travaux pour reproduire fidèlement une main ou même de simplement de modéliser mathématiquement ses mouvements, la complexité de la main humaine défie la technologie moderne.

# Chapitre 2

## Modélisation géométrique et cinématique

### 2.1 Introduction

Afin de faire l'étude mathématique du bras humanoïde, il est nécessaire que ce dernier soit traité comme un bras manipulateur de type série, à présent tous les outils mathématiques utilisés pour les bras manipulateurs peuvent être étendus aux bras robotiques.

### 2.2 Généralités sur la sélection de la loi de commande

Tout d'abord, un robot manipulateur est une machine constituée par :

- une structure mécanique de support
- des actionneurs
- des capteurs
- un système de commande

Donc, nous pouvons définir un robot manipulateur comme une structure mécanique complexe dont les caractéristiques dynamiques varient non seulement en fonction de la charge mais aussi en fonction de la configuration, des vitesses et des accélérations. Dans ce travail, nous n'aborderons pas la construction d'un robot manipulateur.

La plupart des robots utilisent des servomoteurs électriques comme actionneurs. Les caractéristiques des servomoteurs ont un rôle important pour la sélection du système de commande. Dans le cas où le robot utilise des servomoteurs avec de faibles rapports de réduction, les boucles de commande doivent compenser les effets des variations des forces d'inertie et de gravité. Les lois de commande basées sur les modèles dynamiques des robots donnent de très bon résultats dans ce cas. Ils permettent de maintenir la réponse dynamique du système dans certains critères de performance. En utilisant ce type de techniques les robots peuvent évoluer à grandes vitesses. L'inconvénient est lié à la forte dépendance au modèle dynamique. En opposition, quand les articulations sont actionnées par l'intermédiaire de réducteurs à forts rapports de réduction, l'inertie vue par les moteurs varie peu. Dans ce cas, les asservissements peuvent être assurés axe

par axe par des boucles de commande classiques.

La boucle de commande que nous proposons pour le bras manipulateur profite des forts rapports de réduction des servomoteurs et des conditions opératoires de la robotique de service (faibles vitesses, accélérations et jerks).

#### **Définition de la Situation de l'organe terminal :**

Pour définir la situation de l'organe terminal du robot dans l'espace, il faut préciser sa position et son orientation.

Pour définir la position de l'organe terminal dans l'espace, trois représentations sont couramment

utilisées dans la littérature :

- Coordonnées cartésiennes
- Coordonnées cylindriques
- Coordonnées sphérique

Nous utilisons la représentation en coordonnées cartésiennes pour sa simplicité, c'est aussi la plus couramment utilisée.

Pour définir l'orientation de l'organe terminal dans l'espace, plusieurs représentations sont présentées dans la littérature . Par exemple :

- Angles de Bryant
- Angles d'Euler
- Matrice de rotation ou cosinus directeurs
- Quaternion
- Angle plus vecteur

La plus courante des représentations est la matrice de rotation qui a neuf composantes. Elle associe une représentation unique à chaque rotation. Les représentations par quaternion ou par angle plus vecteur sont des représentations à quatre composantes, une de plus que les angles d'Euler ou de Bryant sans les problèmes de singularités de ces représentations. Pour ce travail, nous avons utilisé les quaternions et dans une moindre mesure les matrices de rotation qui constituent la partie rotation des matrices homogènes.

## **2.3 Degré de libertés-Architecture**

### **2.3.1 Liaison**

Une liaison entre 2 solides indéformables (en théorie) limite le d.d.l. d'un solide par rapport à l'autre. On appelle d.d.l. de la liaison le nombre de paramètres indépendants permettant de définir la localisation (position et orientation) d'un solide par rapport à l'autre dans tout déplacement (compatible avec la liaison). Exemples :

- Un cube sur un plan a 3 d.d.l. : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 1 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une sphère sur un plan a 5 d.d.l. : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 3 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une porte par rapport au mur a 1 d.d.l.

## 2.3.2 Mécanismes

On appelle mécanisme un ensemble de solides reliés 2 à 2 par des liaisons. On distingue 2 types de mécanismes :

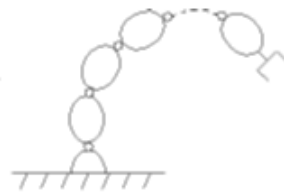
- Les mécanismes en chaîne simple ouverte (ou en série). Lorsque l'on parcourt le mécanisme, on ne repasse jamais 2 fois sur la même liaison, ou sur le même solide. Ce type de système est le plus répandu.
- Les mécanismes en chaîne complexe, i.e., tout ce qui n'est pas en série (au moins un solide avec plus de 2 liaisons). De tels systèmes se subdivisent en 2 groupes : les chaînes structurées en arbre, et les chaînes fermées (dont l'avantage est d'être a priori plus rigide, plus précis, capable de manipuler de lourdes charges). A titre d'exemple, le pantographe<sup>7</sup> est un mécanisme en chaîne fermée.

Pour représenter un mécanisme, on dispose de 2 méthodes :

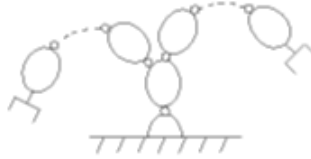
- Le schéma cinématique<sup>8</sup> : On utilise la représentation normalisée des liaisons pour représenter le mécanisme, soit en perspective, soit en projection.
- Le graphe, non normalisé. A titre d'exemples, considérons quelques mécanismes :  
rq : <sup>7</sup> Un pantographe est un instrument formé de 4 tiges articulées, servant à reproduire mécaniquement un dessin, le cas échéant à une échelle différente.

<sup>8</sup> Relatif au mouvement.

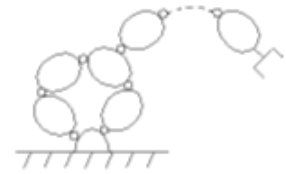
Définition (degré de liberté, d.d.l.) : Le nombre de d.d.l. d'un mécanisme est le nombre de paramètres indépendants qui permettent de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement.



*chaîne simple ouverte*



*chaîne structurée en arbre*



*chaîne fermée*

Exemples :

- Chaînes simples ouvertes

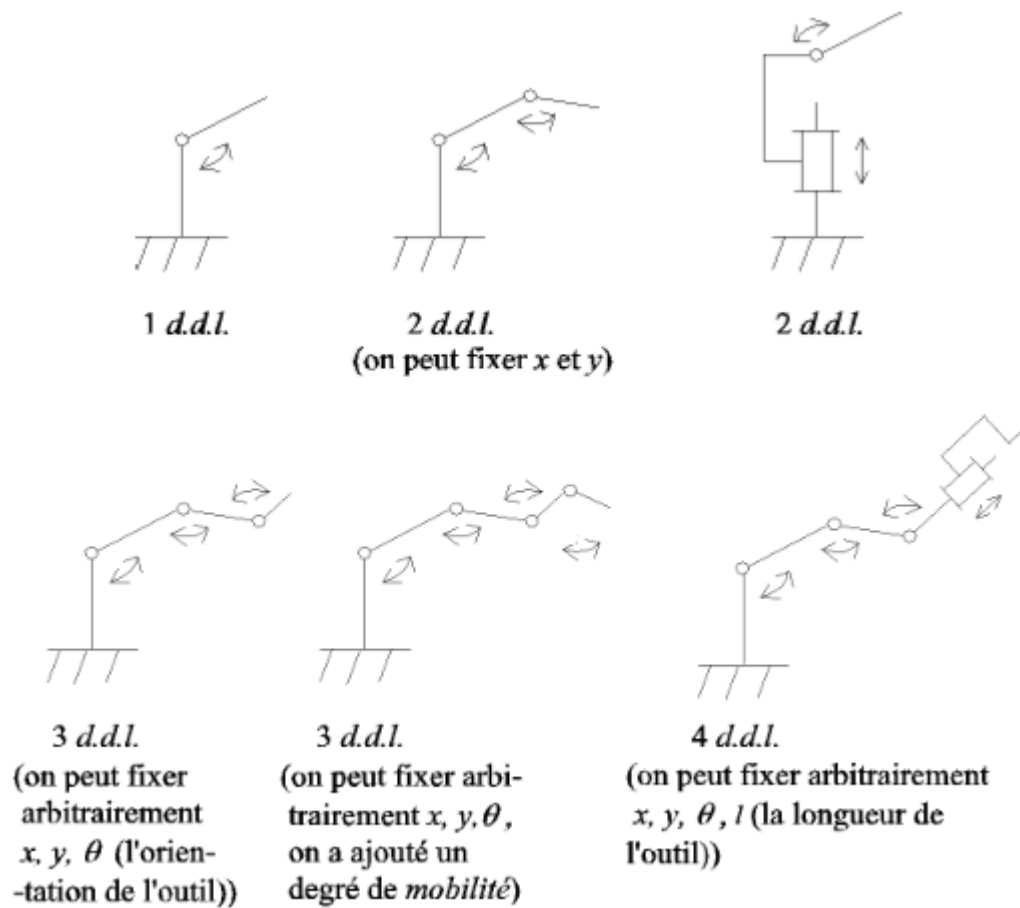


FIGURE 2.1 – exemples des Chaînes simples ouvertes

— Chaînes complexes

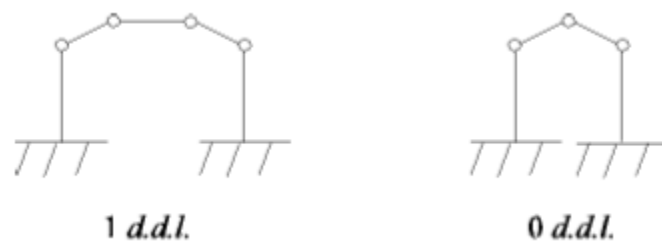


FIGURE 2.2 – exemples des Chaînes complexes

Définition (redundant) : Un robot est redondant lorsque le nombre de *d.d.l.* du mécanisme est inférieur au nombre d'articulations indépendantes (motorisées). Cette propriété permet de préserver les capacités de déplacement de l'organe terminal en présence d'obstacles, le (ou les) *d.d.l.* supplémentaire(s) autorisant leur contournement.

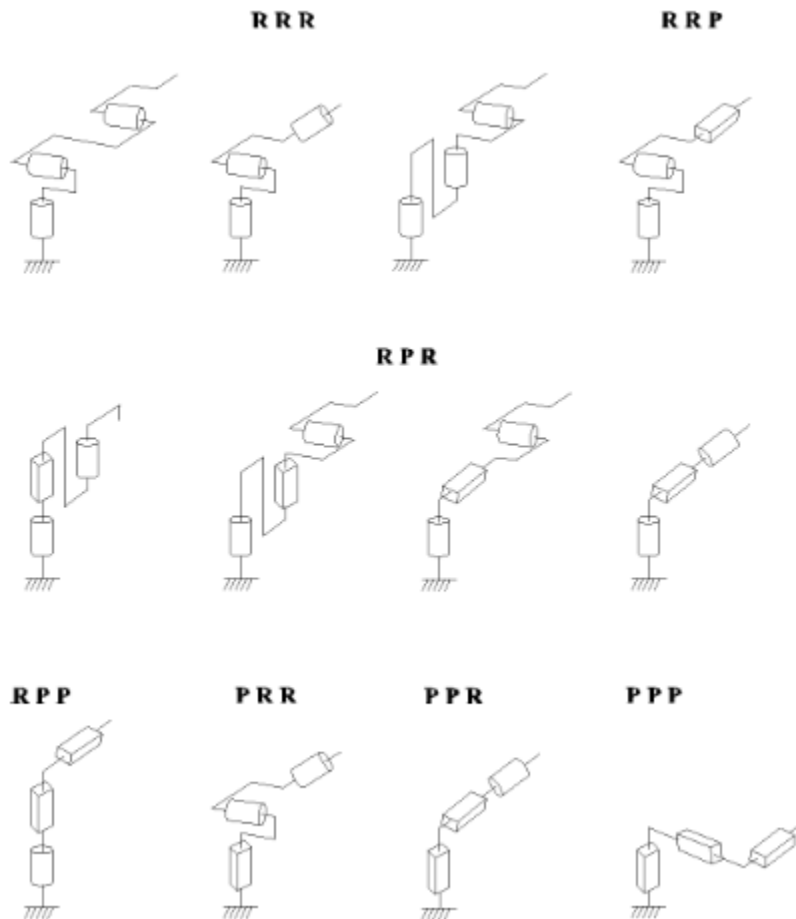


### 2.3.3 Morphologie des robots manipulateurs

Ce paragraphe est relatif aux chaînes ouvertes simples. Afin de dénombrer les différentes architectures possibles, on ne considère que 2 paramètres : le type d'articulation (rotoïde ( $R$ ) ou prismatique ( $P$ )) et l'angle que font deux axes articulaires successifs (0 ou 90 ; sauf cas très particulier, les axes consécutifs d'un robot sont soit parallèles, soit perpendiculaires).

On convient d'appeler les 3 premiers *d.d.l.* le porteur du robot. Les *d.d.l.* résiduels forment le poignet, caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et une plus faible masse.

Sont schématisées dans la figure qui suit les 12 morphologies possibles de porteur (ces morphologies sont non redondantes (on élimine *a priori* les structures limitant les mouvements du porteur à des déplacements linéaires ou planaires : 3 liaisons prismatiques d'axes parallèles, par exemple, ou 3 liaisons rotoïdes d'axes parallèles)).

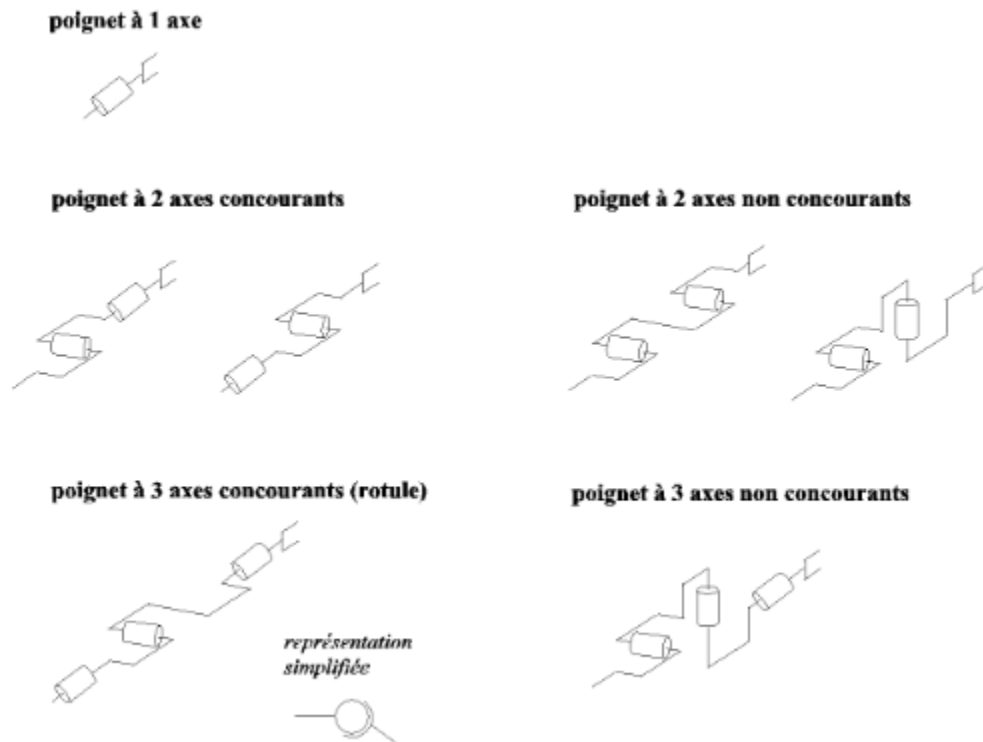


Dans la pratique, on trouve les 5 structures suivantes :

- Les porteurs anthropomorphes (RRR), et plus précisément la première structure de cette classe (cf. figure précédente), comme par exemple les robots FANUC (LR, ARC), STÄUBLI RX, ACMA (V80 et SR400), UNIMATION (PUMA), SCEMI (6P-01), AID (V5), CINCINNATI (T3-7XX), AKR 3000, ASEA (IRB6 et 60), KUKA (IR600), AXEA (V08).

- Les porteurs sphériques ( $RRP$ ) comme par exemple les robots STANFORD, UNIMATION (1000, 2000, 4000), PSA (BARNABE).
- Les porteurs toriques ( $RPR$ ) et plus précisément la première structure de cette classe, comme par exemple les robots  $ACMA(H80)$ , les robots de type SCARA (IBM, AXERA, ADEPT, ...).
- Les porteurs cylindriques ( $RPP$ ) comme par exemple les robots ACMA (TH8), MANTEC (A, I et M), CINCINNATI (T3-363)
- Les porteurs cartésiens ( $PPP$ ) comme par exemple les robots ACMA (P80), IBM (7565), SORMEL (CADRATIC), OLIVETTI (SIGMA).

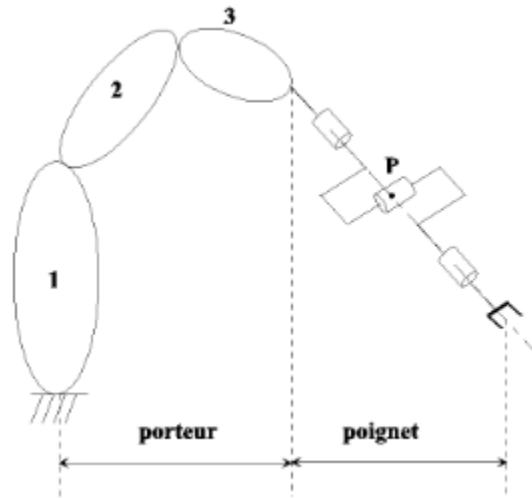
La structure  $RRR$  dont les 3 axes sont concourants forme ainsi une rotule et s'utilise plus généralement comme un poignet. D'autres types de poignets de un à trois axes sont représentés sur la figure suivante.



Dans la pratique, le poignet de type rotule est très répandu. Le robot, obtenu en lui associant un porteur à  $3d.d.l.$ , est la structure la plus classique à  $6d.d.l.$ . Elle permet d'assurer un découplage entre la position et l'orientation de l'organe terminal :

- Le porteur a pour rôle de fixer la position du point d'intersection, noté  $P$ , des axes des 3 dernières articulations (centre du poignet); cette position ( $P$ ) ne dépend que de la configuration des solides (corps) 1, 2 et 3 (i.e., du porteur)
- Le poignet est destiné à l'orientation de l'organe terminal (pince, outil).

Voir la figure suivante.



Cette structure de robot à poignet de type rotule correspond à celle des robots *StäubliRX – 90* et *FANUCARC* ou *LR*.

## 2.4 Rappel sur les transformations

Les angles d'Euler sont un ensemble de trois angles introduits par Leonhard Euler (1707-1783) pour décrire l'orientation d'un solide ou celle d'un référentiel par rapport à un trièdre cartésien de référence. Les trois angles sont dits angle de précession, de nutation et de rotation propre.

Le mouvement d'un solide par rapport à un référentiel (un avion dans l'air, un sous-marin dans l'eau, des skis sur une pente...) fait intervenir six paramètres, qui sont, par exemple, les trois coordonnées décrivant la position de son centre de masse (ou d'un point quelconque du solide) et trois angles, nommés les angles d'Euler, cf. les schémas ci-dessous.

Les angles d'Euler peuvent aussi servir à représenter l'orientation d'un solide par rapport à un repère (appelé aussi attitude en astronautique); on peut les voir comme une généralisation des coordonnées sphériques.

Les trois angles d'Euler sont couramment notés  $\psi$ ,  $\theta$  et  $\phi$

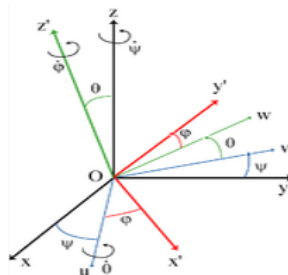


FIGURE 2.3 – Les trois angles d'Euler

Angles d'Euler  $\psi$ ,  $\theta$  et  $\phi$ . Le système fixe est indiqué en noir ( $Oxyz$ ), le système mobile en rouge ( $Ox'y'z'$ ) et la ligne des nœuds en bleu ( $Ou$ ).

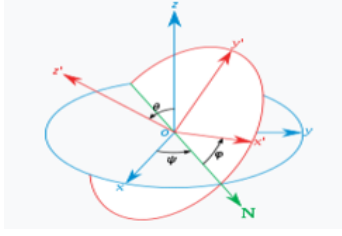


FIGURE 2.4 – Autre présentation

## 2.5 Convention de Denavit-Hartenberg

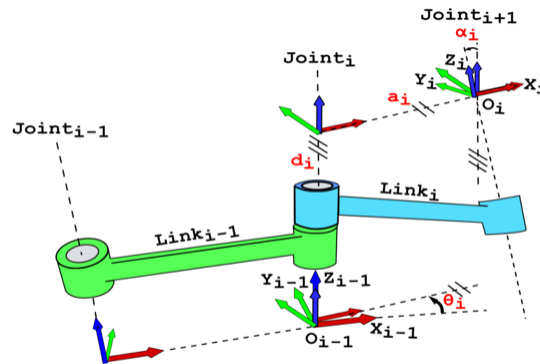
La convention de  $D - H$  permet de construire itérativement l'ensemble des transformations homogènes de la structure mécanique.

Chaque transformation  ${}^{i-1}A_i$  est décomposée en quatre transformations élémentaires ( $RTTR$ ) :

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les quatre paramètres de transformation suivants sont appelés paramètres  $D - H$  :

- $\theta_i$  est l'angle entre  $X_{i-1}$  et  $X_i$  autour de l'axe  $Z_i$ .
- $d_i$  est la distance entre l'origine  $O_{i-1}$  et l'axe  $X_{i-1}$ .
- $\alpha_i$  est l'angle entre  $Z_{i-1}$  et  $Z_i$  autour de l'axe  $X_{i-1}$ .
- $r_i$  est la distance entre l'origine  $O_i$  et l'axe  $X_{i-1}$ .



## 2.6 Modélisation géométrique

### 2.6.1 Modélisation géométrique directe

Le modèle géométrique direct ( $MGD$ ) exprime la pose de l'effecteur final  $X$  en fonction des variables articulaires  $q$  et des paramètres géométriques  $\xi$  du robot

$$X = MGD(q, \xi)$$

(2.1)

## 2.6.2 Modélisation géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer la configuration des liaisons, en fonction de la configuration (position et orientation) de l'effecteur d'un robot. Il existe 2 types de liaisons, les liaisons pivots et les liaisons glissières.

- La liaison pivot permet des mouvements de rotation et est caractérisée par un angle.
- La liaison glissière permet des mouvements de translation et est caractérisée par une distance.

L'effecteur peut être une pince, une caméra, une pompe de peinture, ...

Le modèle géométrique inverse est utilisé pour caractériser le fonctionnement d'un bras manipulateur. Concrètement le modèle géométrique inverse permet de calculer la position de chaque moteur (liaison) du robot en fonction de la position et de l'orientation de l'organe terminal (effecteur).

Le modèle géométrique inverse (*MGI*) exprime les variables articulaires  $q$  en fonction de la pose de l'effecteur final  $X$  et des paramètres géométriques  $\xi$  du robot :

$$q = MGI(X, \xi) \quad (2.2)$$

## 2.7 Modélisation cinématique

### 2.7.1 Modélisation cinématique directe

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

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (2.3)$$

Où  $J(q)$  désigne la matrice Jacobienne de dimension  $(m * n)$  et  $\dot{X}$  forme se qu'on appelle le Torseur cinématique.

La cinématique directe permet de faire des mouvements d'arcs précis et bien définis puisqu'on contrôle directement les rotations des articulations.

## 2.7.2 La Jacobienne analytique

Le Jacobien de ce système  $y = f(x)$  est la matrice constituée des dérivées partielles de celui-ci.

$$J(x_1, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} \frac{\delta y_1}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta y_1}{\delta x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta y_n}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta y_n}{\delta x_n} \end{pmatrix}$$

Le Jacobien permet donc de déterminer la pente (la variation) du vecteur  $y$  en fonction d'un vecteur  $x$  donné, étant donné les équations  $f$ .

## 2.7.3 Jacobienne géométrique

Le Jacobien géométrique est déduit à partir des différentes transformations homogènes de  $D - H$ .

La matrice :

$$\begin{bmatrix} J_p \\ J_o \end{bmatrix} \in R^{6 \times n}$$

Est le Jacobien géométrique du manipulateur (une fonction des variables d'articulation).

Le Jacobien  $J$  peut être partitionné en vecteurs colonnes :  $J_{p_i}, J_{o_i} \in R^{3 \times 1}$ , comme :

$$\begin{bmatrix} J_{p_1} & J_{p_2} \dots & J_{p_n} \\ J_{o_1} & J_{o_2} \dots & J_{o_n} \end{bmatrix} \in R^{6 \times n}$$

Où

$$\begin{bmatrix} J_{p_i} \\ J_{o_i} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} Z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ si l'articulation est prismatique} \\ \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times (P_e - P_{i-1}) \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} \text{ si l'articulation est rotoïde} \end{array} \right\}$$

En effet :

- $Z_{i-1}$  est donné par la troisième colonne de la matrice de rotation  $R^{i-1}$
- $P_e$  est donné par les trois premiers éléments de la quatrième colonne de la matrice de transformation  $T^0_e$ .
- $P_{i-1}$  est donné par les trois premiers éléments de la quatrième colonne de la matrice de transformation  $T^0_{i-1}$ .

## 2.7.4 Modélisation cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse permet de déterminer la vitesse des variables conjointes en fonction de la vitesse des variables opérationnelles. Pour les manipulateurs non redondants, le modèle s'écrit :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (2.4)$$

La solution de l'équation précédente existe si ( $J$ ) est de rang plein, cela est valable tant que le manipulateur ne passe pas par une configuration singulière. Pour les manipulateurs redondants, le modèle cinématique inverse admet plusieurs solutions possibles.

## 2.8 La tâche additionnelle

Une méthode consiste à projeter une tâche secondaire sur le noyau de la Jacobienne en utilisant le projecteur orthogonal ( $I - J^+J$ )

$${}_{add} = (I - J^+J)Z \quad (2.5)$$

Plus généralement, en algèbre linéaire, une projection orthogonale est un projecteur tel que les deux sous-espaces sont orthogonaux. L'effet du projecteur est d'éliminer le composant qui influence . Donc nous avons :

$${}_{add}=0 \quad (2.6)$$

Le vecteur  $Z \in R$ , a priori quelconque, peut être utilisé pour optimiser une performance locale. Il peut alors être déterminé comme :

$$Z = \alpha \nabla \phi = \alpha \begin{bmatrix} \frac{\delta \phi}{\delta q_1} \\ \vdots \\ \frac{\delta \phi}{\delta q_n} \end{bmatrix}$$

- $\alpha > 0$  conduit à une croissance de  $\phi$
- $\alpha < 0$  conduit à une décroissance de  $\phi$

Un exemple de fonction  $\phi$  pour l'éloignement aux butées est :

$$\phi(q) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{q_i - q_{i_{moy}}}{\Delta q_i} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$avec : \quad \Delta q_i = (q_{i_{max}} - q_{i_{min}}) \quad (2.8)$$

## 2.9 Génération de mouvement

La tâche de déplacement d'un robot est spécifiée en définissant un chemin que le robot doit suivre. Un chemin est une séquence de points définis soit dans l'espace des tâches (opérationnel) (afin de situer l'organe terminal), soit dans l'espace des configurations (articulaire) du robot (afin d'indiquer les valeurs des paramètres de liaison).

Ces points peuvent être :

- programmés par apprentissage
- issus d'une base de données d'un système de CAO, ...

Le problème de la génération de mouvement est de calculer les séquences souhaitées (consigne) de variables articulaires ou de variables liées à l'organe terminal qui assurent le passage du robot par le chemin désiré.

Les trajectoires d'un robot peut être classifiées comme suit :

- les mouvements entre 2 points avec des mouvements libres entre les points
- les mouvements entre 2 points via une séquence de points intermédiaires désirés, spécifiés notamment pour éviter les obstacles ; la trajectoire est libre entre les points intermédiaires
- les mouvements entre 2 points, la trajectoire étant contrainte entre les points (trajectoire rectiligne par exemple)
- les mouvements entre 2 points via des points intermédiaires, la trajectoire étant contrainte entre les points intermédiaires.

Dans les deux premiers cas, la génération de mouvement peut se faire directement dans l'espace des configurations : elle se traduit par une séquence de positions articulaires constituant les consignes des asservissements.

Dans les deux derniers cas, la trajectoire étant fixée à tout instant dans l'espace opérationnel, il est préférable de raisonner dans cet espace. La loi de commande engendrée doit ensuite être transformée en consignes articulaires par le changeur de coordonnées.

Ces 2 approches – génération de mouvement dans l'espace articulaire et génération de mouvement dans l'espace opérationnel – sont schématisées sur les figures suivantes.

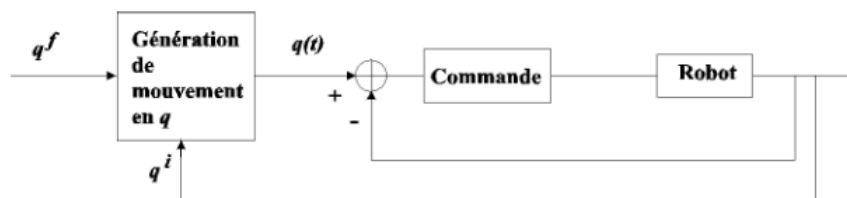


FIGURE 2.5 – Génération de mouvement dans l'espace articulaire



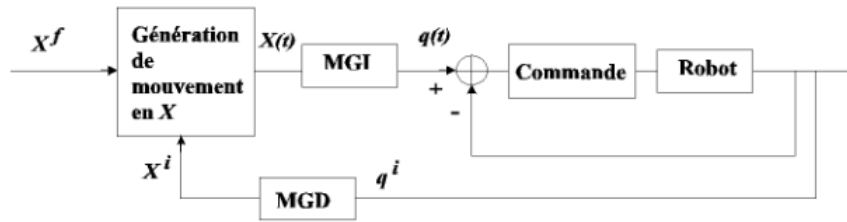


FIGURE 2.6 – Génération de mouvement dans l’espace opérationnel

- La génération de mouvement dans l’espace articulaire présente plusieurs avantages :
- le mouvement est minimal sur chaque articulation
  - elle nécessite moins de calcul en ligne (au sens où il n’y a pas de changeur de coordonnées)
  - le mouvement n’est pas affecté par le passage sur les configurations singulières
  - les contraintes de vitesse et de couples maximaux sont connues avec précision puisqu’elles correspondent aux limites physiques des actionneurs.

En contrepartie, la géométrie de la trajectoire dans l’espace opérationnel ne peut être imposée. Entre 2 points donnés, l’organe terminal se déplace de façon imprévisible mais répétitive (ce qui peut occasionner des collisions lorsque le robot évolue dans un environnement encombré). Ce type de mouvement est par conséquent approprié pour réaliser des déplacements rapides dans un espace dégagé.

La génération de mouvement dans l’espace opérationnel permet de contrôler la géométrie de la trajectoire (mouvement rectiligne par exemple). Par contre :

- elle implique la transformation en coordonnées articulaires de chaque point de la trajectoire
- elle peut être mise en échec lorsque la trajectoire calculée passe par une position singulière
- elle peut être mise en échec chaque fois que les points de la trajectoire engendrée ne sont pas dans le volume accessible du robot ou chaque fois que la trajectoire impose une reconfiguration du mécanisme (changement d’aspect en cours de trajectoire).

## 2.10 Conclusion

Pour modéliser un robot en série à  $n$  articulations, il faut représenter le comportement de ce robot sous la forme d’un modèle. une telle approche est appelée modélisation. En général, nous recherchons toujours le modèle le plus simple qui permet d’expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du procédé dans son domaine d’application, les modèles de transformation entre l’espace opérationnel et l’espace articulaire.

On distingue :

- Les modèles géométriques qui expriment la situation de l’organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme.
- Les modèles cinématiques permettent de contrôler la vitesse de déplacement du robot afin de connaître la durée d’exécution d’une tâche pour développer ces deux modèles il faut suivre une méthode systématique. Il s’agit de la méthode

Denavit-Hartenberg, qui est toujours la méthode la plus utilisée dans la robotique en série, on peut voir les doigts d'une main robotisée devenir un robot en série.

# Chapitre 3

## Conception mécanique

### 3.1 Introduction

La main humaine possède une architecture qui lui permet d'être largement étalée, la perte d'un tel instrument est dramatique car la reproduction artificielle d'un mécanisme aussi complexe pose plusieurs problèmes. Le nombre de pièces mécaniques qui doivent être conçues et assemblées dans un volume très restreint, le poids d'un tel assemblage qui est d'autant plus important car le mécanisme est littéralement porté à bout de bras toute la journée

Dans ce chapitre, le processus complet de conception mécanique de la main inmoov, à partir de la recherche décrite dimensionnant notre propre bras robotique, imprime la pièce en 3D et l'assemblage pour créer un prototype fonctionnel.

### 3.2 Procédés d'impression

Le processus d'impression a été réalisé en analysant physiquement et mécaniquement les pièces afin de déduire si elles seraient en mesure de supporter l'effort à subir. L'ordre d'impression a été la main, le poignet et, l'avant-bras, le biceps et, enfin, l'épaule. Les figures suivantes montrent des pièces imprimées représentatives .

Il convient de noter que toutes les pièces ont nécessité d'une procédure de prétraitement afin d'ajuster les tolérances des trous, de lisser les surfaces à coller .

La main d'InMoov est une main qui possède cinq doigts à configuration humaine (le pouce est opposable).le poids total calculé comprend les deux parties : la main et le bras. Cette valeur numérique est égale à 0,722 kg.

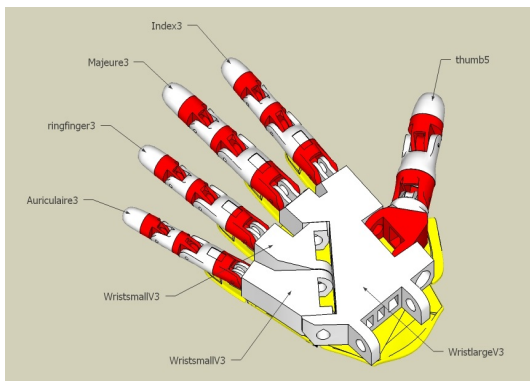


FIGURE 3.1 – Pièce imprimer eb 3D

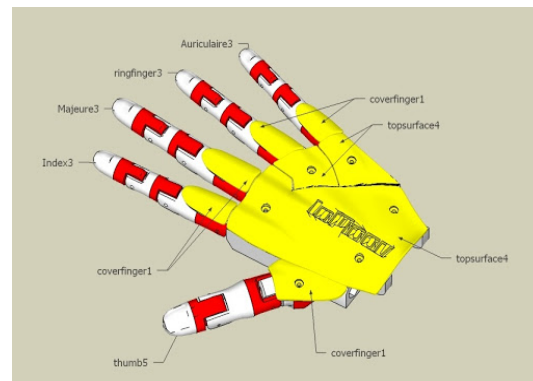
### 3.3 La main

Quant aux degrés de liberté, la main a 15 ddl. Chaque doigt, à l'exception du pouce, a 3 ddl (trois articulations différentes). Le pouce en a deux, et le reste est dû à la rotation du poignet. Le compromis avec la simplicité et le faible coût nous a conduit à choisir cette conception d'une main avec 15 ddl, ce qui a même affecté la complexité et la polyvalence du robot.

La main est sous-actionnée puisqu'elle utilise six actionneurs pour déplacer quinze degrés de liberté (moins d'actionneurs que les ddl). Chacun des cinq servomoteurs de l'avant-bras déplace un seul doigt individuellement. Ainsi, certains actionneurs déplacent plus d'un ddl.



(a) Face interne



(b) Face externe

FIGURE 3.2 – La main en 3D

### 3.3.1 Dimensions de la main (cm)

main	Palm	Poignet
Longueur	8.6	2.9
Largeur	9.3	5.4
Épaisseur	2.7	2.7

TABLE 3.1 – Dimensions de la main (cm)

### 3.3.2 Dimensions des doigts (cm)

doigts	Pouce		Index doigt		Milieu doigt		L'annulaire		Petit doigt	
Longueur	7.9		9.5		10		9.5		8.3	
	haut	bas	haut	bas	haut	bas	haut	bas	haut	bas
Largeur	1.7	2	1.5	1.8	1.5	1.8	1.3	1.6	1.2	1.5
Épaisseur	1.6	1.9	1.4	1.7	1.4	1.7	1.2	1.5	1.1	1.4
Périmètre	4.6	6.7	4.4	6.5	4.4	6.5	4.1	6.2	4	6.1

TABLE 3.2 – Dimensions des doigts (cm)

### 3.3.3 Processus de fabrication et d'assemblage

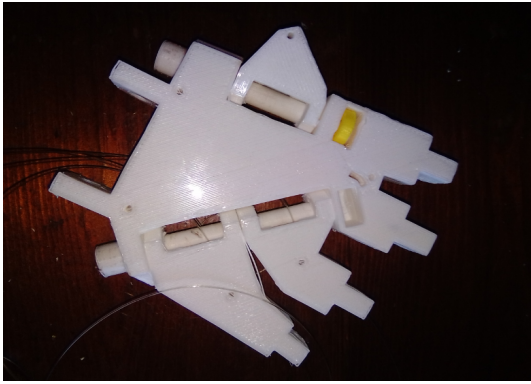
#### a) Étape 1 : Impression 3D des pièces



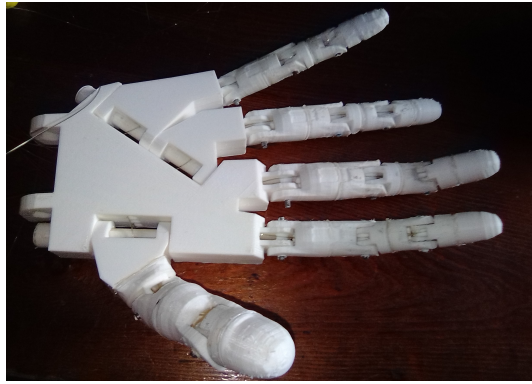
FIGURE 3.3 – Impression 3D des pièces

#### b) Étape 2 : Assemblage des pièces

Ligne de pêche passant entre les doigts car il suffit de couper 10 longueurs de ligne de pêche torsadée et de la faire passer par les trous supérieurs et inférieurs de la paume de la main et le long des doigts où elle est ensuite attachée à un gros nœud pour l'empêcher de descendre le long du doigt. Au cours de cette étape, des vis peuvent être enfoncées dans la paume pour permettre au pouce, au petit doigt et à l'annulaire de se déplacer vers l'intérieur de la paume.



(a) Base et paume de la main



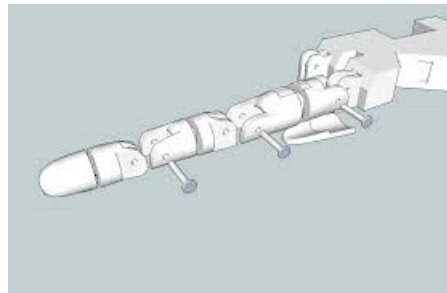
(b) Tous les doigts de la main assemblés

FIGURE 3.4 – Assemblage de la main

### 3.3.4 Force exercée sur les câbles et les emplacements

Il n'est pas possible de placer un servomoteur à chaque DOF du doigt en raison de la restriction de taille. En solution, ces doigts doivent être actionnés à distance avec un seul servomoteur par doigt. Cela peut être réalisé en utilisant un mécanisme actionné par un tendon, dans lequel un tendon (câble) passe sur chaque articulation du doigt de sorte que le doigt est actionné à l'aide d'un seul servomoteur. Avant de procéder à la conception, il a été nécessaire de se familiariser avec les mécanismes actionnés par les tendons en imprimant en 3D et en assemblant une main artificielle,

Chaque doigt était constitué de six parties différentes et la zone de la paume était divisée en trois parties. La zone de la paume sous l'annulaire et l'auriculaire ont été conçus séparément pour compenser le mouvement des os métacarpiens présents dans la paume. L'amplitude de mouvement des os métacarpiens varie d'un doigt à l'autre. Elle est moindre pour l'index et le majeur, alors qu'elle est plus grande pour l'annulaire et le petit doigt.



La mise en place d'un pouce ajustable pour permettre la fermeture complète de la main

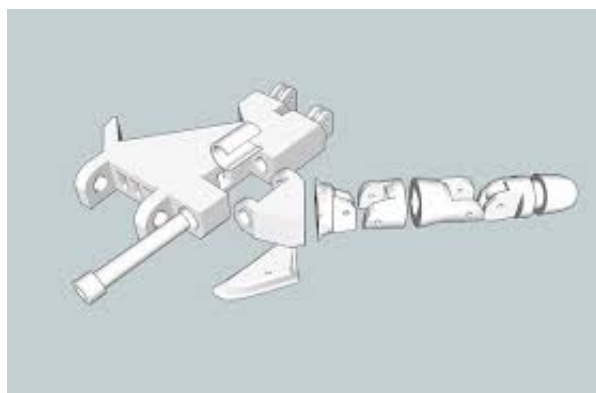


FIGURE 3.5 – Le pouce

### 3.4 L'avant-bras (Boucle PS)

De la même manière que les pièces sont imprimées et fixées, l'avant-bras ( qui représentant les deux os du radius et du cubitus dans la main humaine ) contiendra les cinq servomoteurs qui contrôlent les doigts et aussi le servomoteur qui contrôle la rotation de la main et le point qui la relie à l'humérus qui contient les biceps dans la main humaine et qui représente le coude.

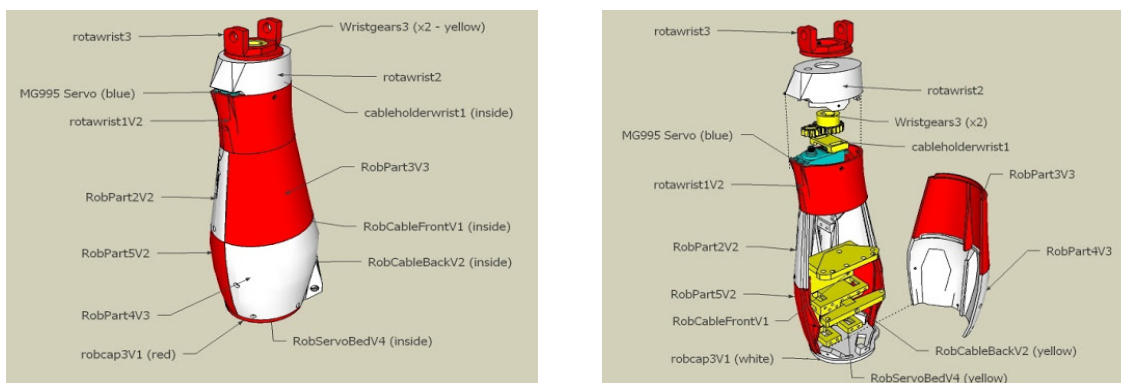


FIGURE 3.6 – L'avant-bras en 3D

#### 3.4.1 Dimensions de l'avant-bras (cm)

avant-bras	Total	Partie plus petite	Une plus grande partie
Longueur	27.6		X
Largeur	X	6.4	10.9
Épaisseur		4.3	19.1
Périmètre		17.4	33.2

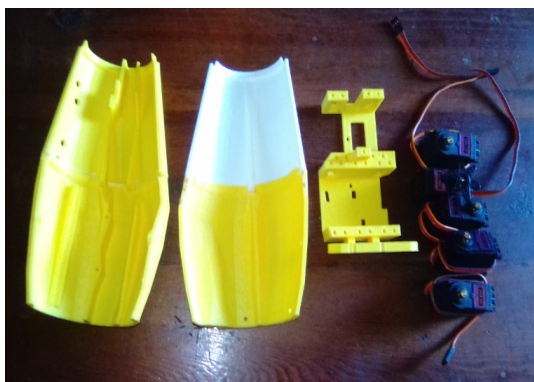
TABLE 3.3 – Dimensions de l'avant-bras (cm)

#### 3.4.2 Processus de fabrication et d'assemblage

Étape 1 : Impression 3D des pièces

## Étape 2 : Assemblage des pièces

Le fonctionnement principal de l'avant-bras est enfermer les actionneurs qui entraînent les doigts. Ainsi, les six servomoteurs ont été placés dans la position suivante : cinq sur l'avant-bras et un sur le poignet rotatif.



(a) Pièce du L'avant-bras



(b) Pièce du poignet



(c) Pièce du poignet



(d) Pièce du poignet

FIGURE 3.7 – L'assemblage de l'avant-bras

Les servomoteurs sont des dispositifs électriques autonomes qui font tourner ou poussent les pièces d'une machine avec une grande précision. Dans ce projet, le mécanisme de rotation tend et relâche les tendons de telle sorte que les doigts fléchissent ou s'allongent.

Six actionneurs ou servomoteurs ont été placés. Une petite poulie a été couplée à chaque servomoteur, comme l'illustre la figure suivante

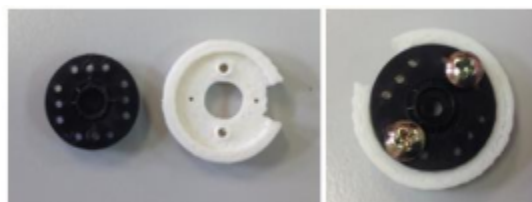


FIGURE 3.8 – Poulie

Afin de maximiser l'espace destiné aux servomoteurs sur l'avant-bras, trois d'entre eux ont été placés ensemble et, en dessous, les deux autres. En outre, les trois premiers



servomoteurs ont été placés dans des directions opposées pour faciliter la rotation de tous. Le mécanisme décrivant l'ensemble est illustré par la figure suivante montrant le résultat final après l'accouplement des cinq servomoteurs. Pour fixer les servomoteurs au bon endroit, des petites vis ont été utilisées.

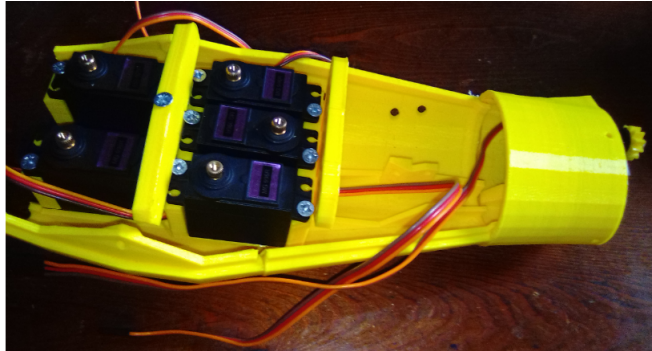


FIGURE 3.9 – Placement des servomoteurs

Un système à engrenages a été mis en place pour contrôler la rotation du poignet. Un petit engrenage a été imprimé en 3D et pressé sur un arbre de servo qui conduirait alors un plus grand engrenage relié à la section de palme.

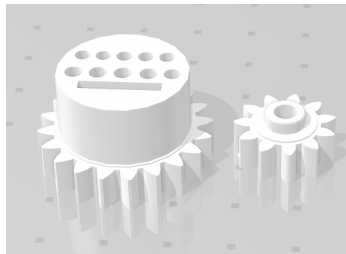


FIGURE 3.10 – Système à engrenages

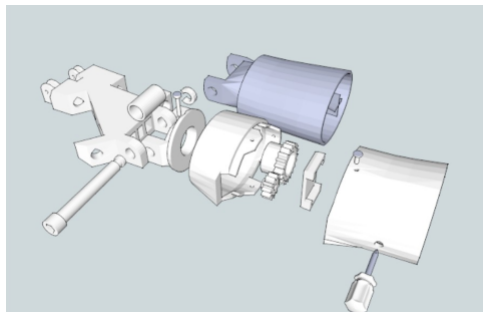


FIGURE 3.11 – Mécanisme de rotation du poignet

Par contre, le moteur du poignet était directement couplé, car il n'y a pas de tendons dans cette partie. Sa rotation provoque un mouvement dans tout le poignet. Pour cela, l'engrenage imprimé est apparié avec le servomoteur afin de transmettre correctement la transmission.

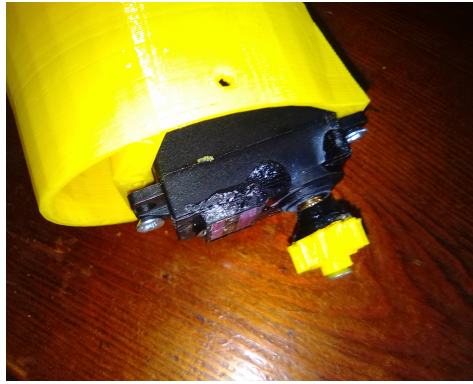
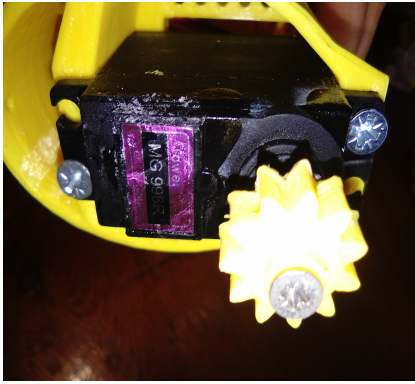


FIGURE 3.12 – Placement de moteur du poignet

la figure suivante montrant le couplage de poignet avec la main

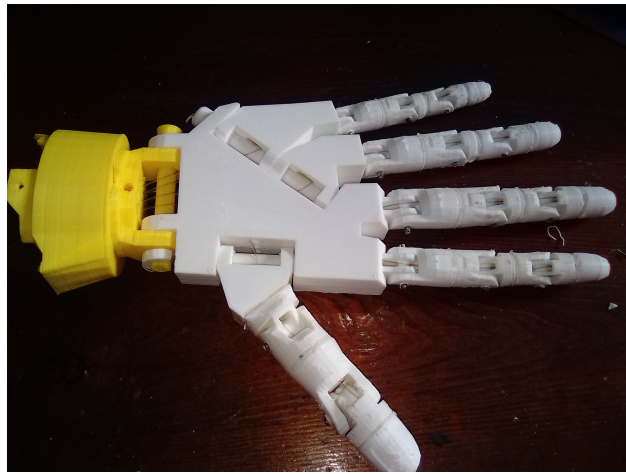


FIGURE 3.13 – Couplage de le poignet avec la main

Enfin, comme dernière étape de la partie mécanique, des tendons ont été insérés dans la main et l'avant-bras par le poignet. Le matériau couplant le mouvement des actionneurs à celui des doigts a été une ligne de pêche en nylon.

Comme déjà mentionné ci-dessus, la procédure a consisté à insérer quelques lignes de pêche dans chaque doigt. Une ligne sert à allonger le doigt et l'autre, à le fléchir. Les pièces ont été préparées avec des trous déterminant le chemin que le fil devait suivre. Ainsi, les tendons ont été serrés à travers la main et le poignet.

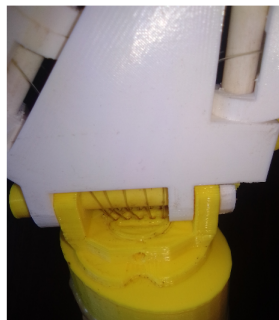


FIGURE 3.14 – Couplage de le poignet avec la main

et voici le résultat final après l'accouplement de la main, du poignet et de l'avant-bras

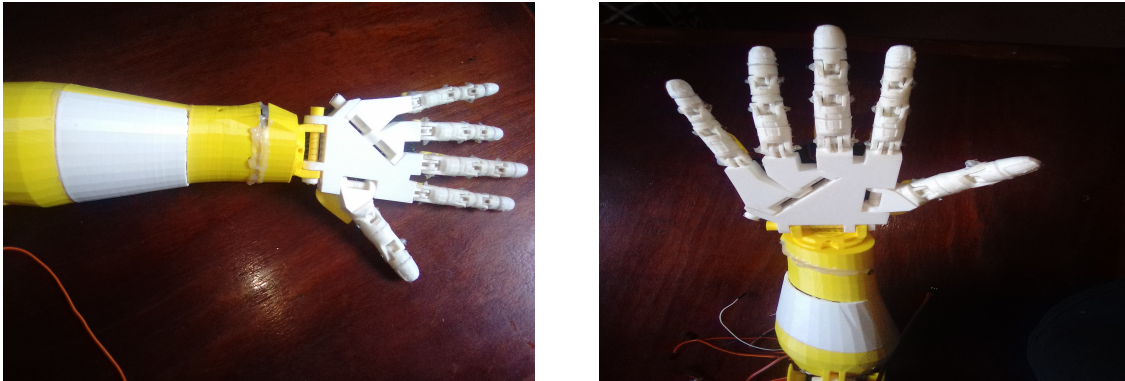
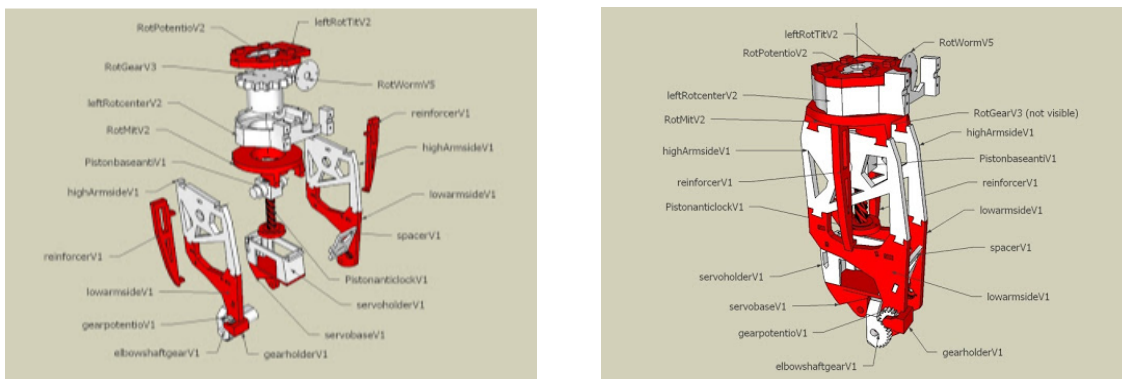


FIGURE 3.15 – Avant-bras fermé après l'accouplement des tendons et des servomoteurs

### 3.5 Biceps

Pour compléter le bras, la partie manquante est le biceps. Cette partie contient deux servos : l'un responsable de la rotation de tout le bras, et l'autre du mouvement de l'articulation du coude.



(a) Pièce démontée

(b) Pièce assemblée

FIGURE 3.16 – Biceps en 3D

#### 3.5.1 Processus de fabrication et d'assemblage

- a) Étape 1 : Impression 3D des pièces
- b) Étape 2 : Assemblage des pièces

Pour l'assemblage de la partie biceps, nous commençons par la partie supérieure responsable de la rotation du bras complet. Comme cette partie est équipée d'un engrenage à vis sans fin, nous allons commencer par la partie supérieure responsable de la rotation du bras complet.

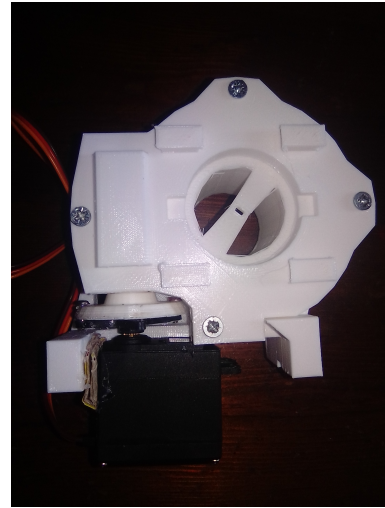
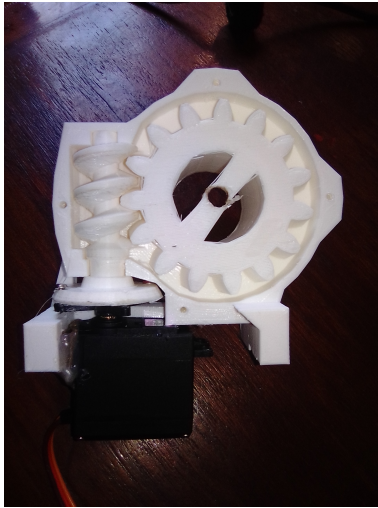


FIGURE 3.17 – Engrenage à vis sans fin

Maintenant, toutes les parties imprimées en plastique qui forment la structure du biceps seront ajoutées à la partie précédente comme le montre la figure suivante.

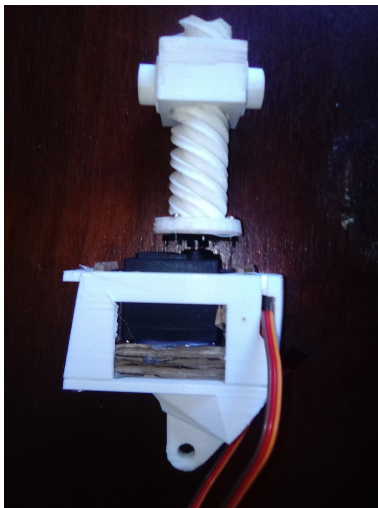


FIGURE 3.18 – Servomoteur responsable du mouvement du coude



FIGURE 3.19 – Bicep

FIGURE 3.20 – Assemblage de bicep

Avant de fixer le dernier servo, nous allons l'assembler à côté de l'avant-bras en utilisant une vis en plastique imprimée pour les maintenir ensemble. Une fois que le bras est complètement assemblé, nous pouvons alors fixer le servo de biceps à sa place qui contrôle le mouvement de coude.

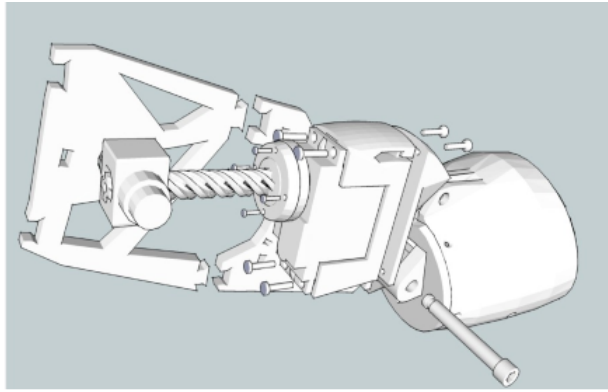


FIGURE 3.21 – Relier biceps et avant bras en 3D

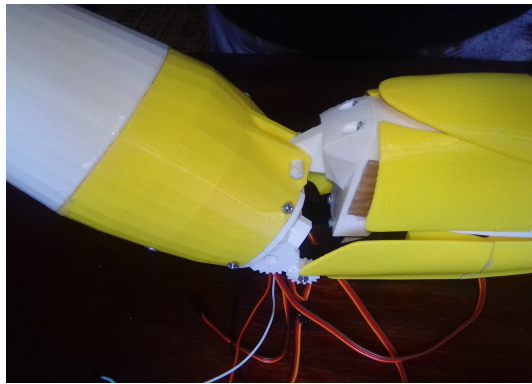
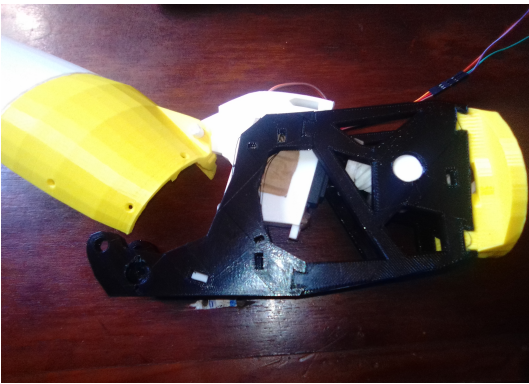


FIGURE 3.22 – Relier biceps et avant bras

En ajoute un petite système a engrenages pour aider leur mouvement .

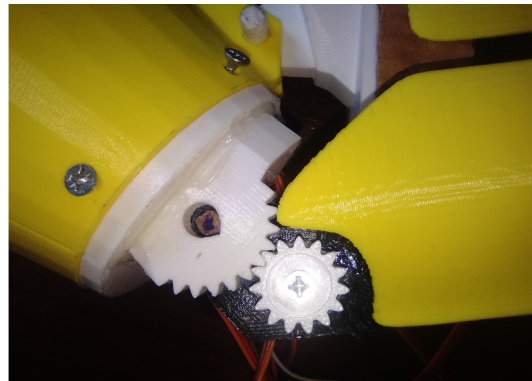
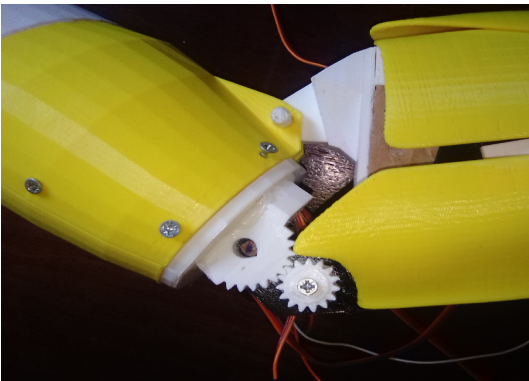


FIGURE 3.23 – Système à engrenages pour aider le mouvement de coude

Enfin, seules les couvertures du biceps doivent être ajoutées pour le terminer.

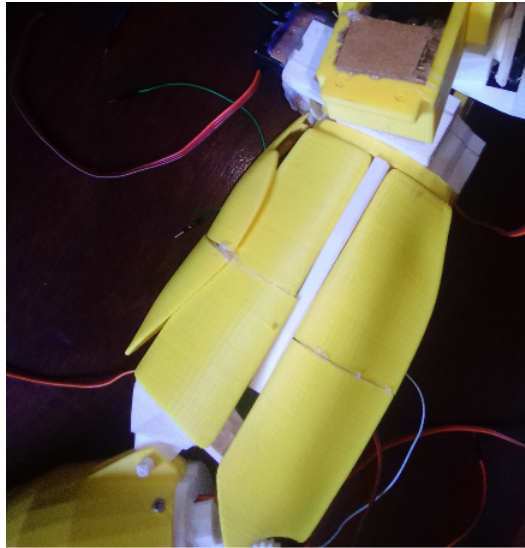


FIGURE 3.24 – Souvertures du biceps

et voici le résultat final après l'accouplement de la main, du poignet , l'avant-bras et bicep

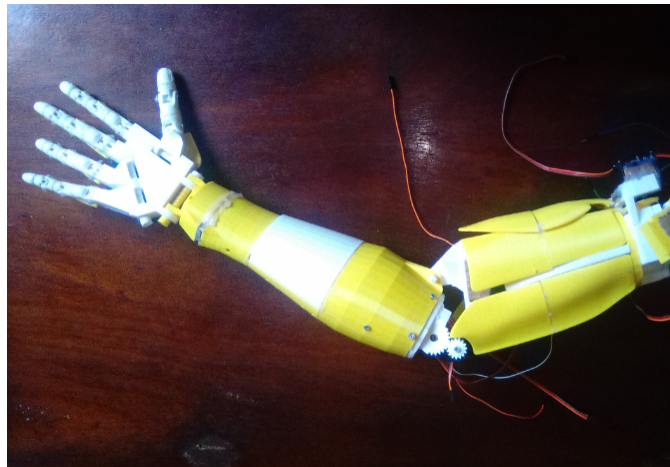
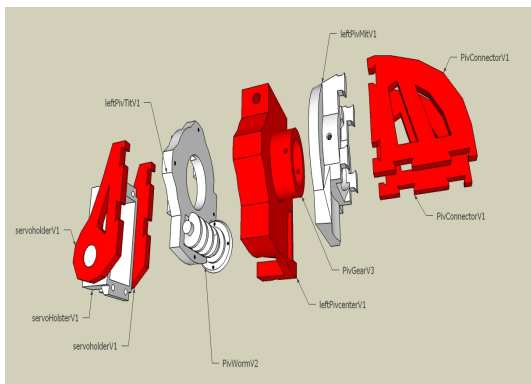


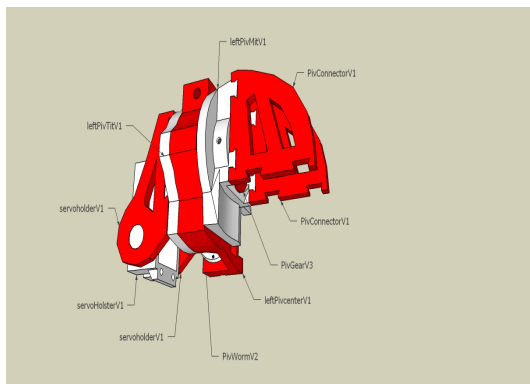
FIGURE 3.25 – L'accouplement de la main, du poignet , l'avant-bras et bicep

## 3.6 Epaule

Deux servos sont utilisés pour le mouvement de l'épaule, l'un pour contrôler la rotation du bras et l'autre pour contrôler le mouvement de levage et d'abaissement.



(a) Pièce démontée



(b) Pièce assemblée

FIGURE 3.26 – Epaule en 3D

### 3.6.1 Processus de fabrication et d'assemblage

a) Étape 1 : Impression 3D des pièces

b) Étape 2 : Assemblage des pièces

Cette partie est similaire à la partie supérieure du biceps. Elle contient le même mécanisme à vis sans fin et nécessite les mêmes actions que dans la partie du biceps pour l'assembler.

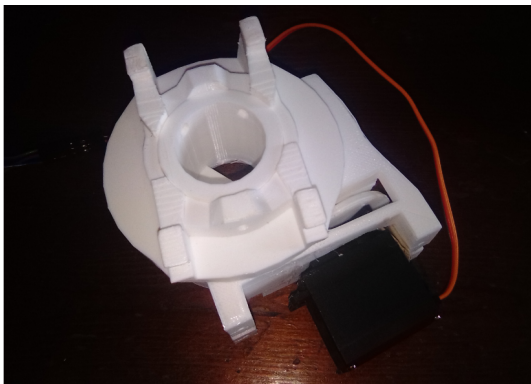


FIGURE 3.27 – Mécanisme à vis sans fin pour la rotation de l'épaule

L'étape suivante consiste à fixer le servo qui va créer le mouvement scapulaire à la partie de l'épaule qui sera ensuite attachée au torse.

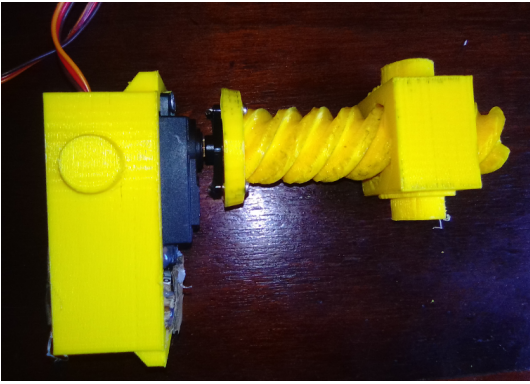


FIGURE 3.28 – Servo-moteur attaché à côté de l'épaule

et voici le résultat final de l'épaule :

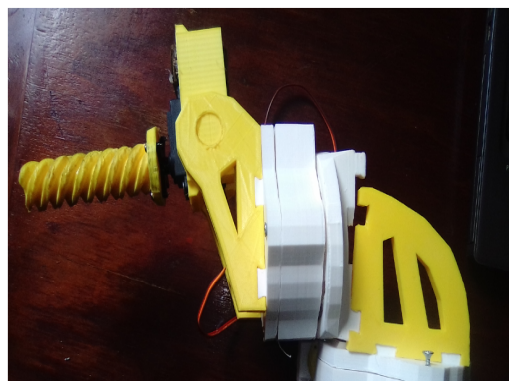
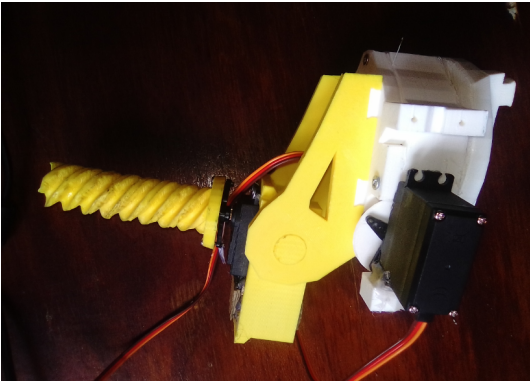


FIGURE 3.29 – Epaule



### 3.7 Assemblage de bras complet

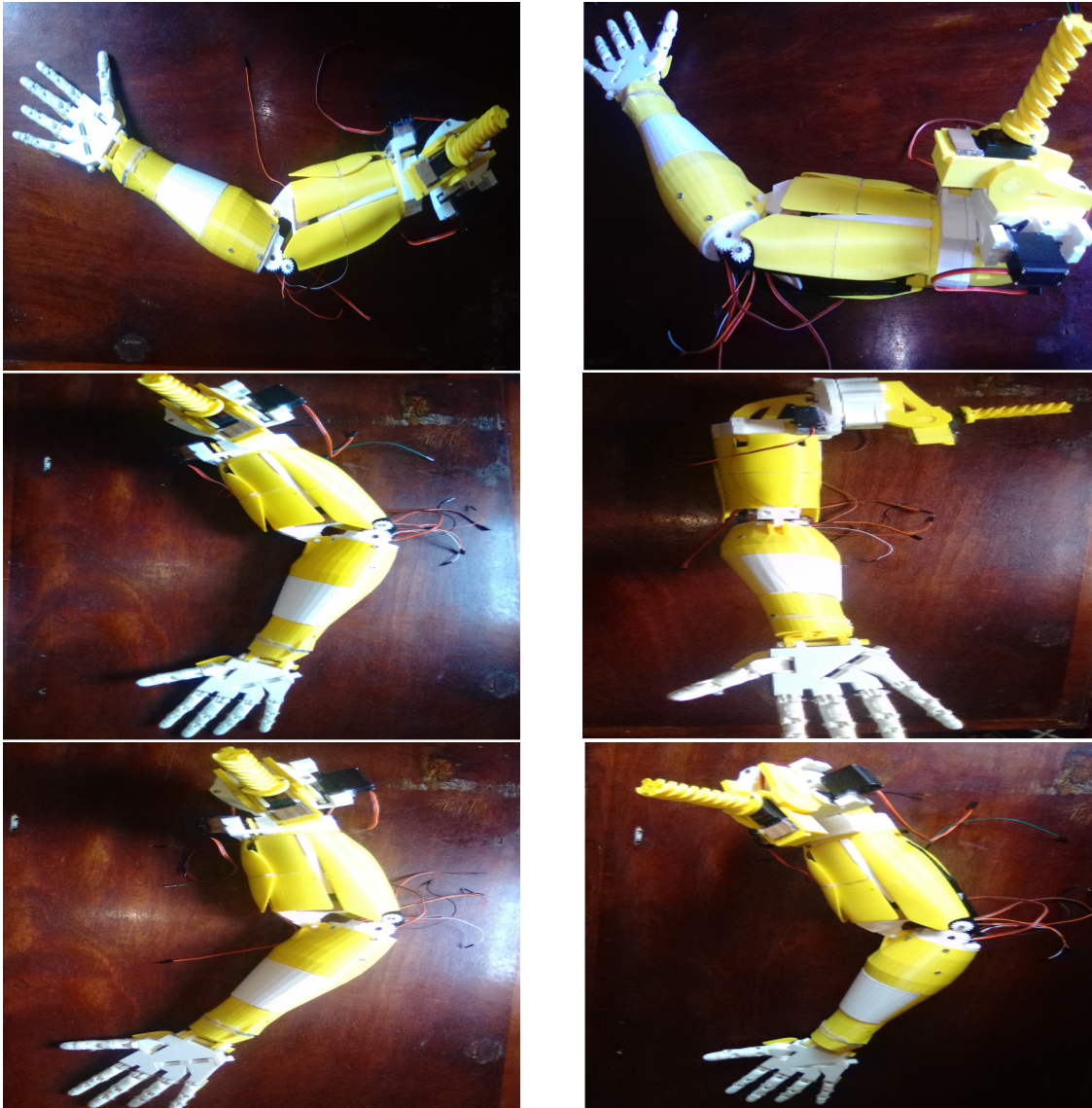


FIGURE 3.30 – Le bras robotique

### 3.8 Conclusion

Comme le montre ce chapitre, l'organisation et la mise en place d'un bon projet peut être une activité très longue. De nombreux aspects et actions doivent être pris en compte afin de rendre possible la réalisation physique du robot.

Il s'est montré les différentes étapes nécessaires pour concevoir un bras anthropomorphe. La difficulté majeure dans ce genre de problème est de trouver un emplacement adéquat aux différents actionneurs en gardant l'aspect anthropomorphe du bras.

# Chapitre 4

## Architecture du système et programmation

### 4.1 Introduction

La conception matérielle du robot n'est pas moins importante que la conception logicielle. La sélection des bons composants, combinée à leur placement correct dans le système, est essentielle pour faire fonctionner le robot .

Ce chapitre traite la conception des matériaux électriques du bras du robot. Toutes les pièces clés seront sélectionnées , les schémas électriques et les programmes seront examinés.

### 4.2 Le matériel utilisé

#### 4.2.1 Arduino Uno

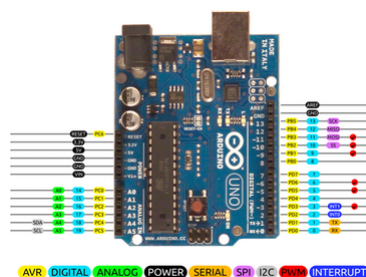


FIGURE 4.1 – Arduino uno

Arduino Uno est une carte microcontrôleur basée sur le microcontrôleur ATmega328P 8 bits. Outre l'ATmega328P, elle comprend d'autres composants tels qu'un oscillateur à cristal, une communication série, un régulateur de tension, etc. pour supporter le microcontrôleur. L'Arduino Uno possède 14 broches d'entrée/sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 broches d'entrée analogiques, une connexion USB, une prise Power barrel, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation.

## a) Arduino Uno à ATmega328 Pin Mapping

Lorsque la puce ATmega328 est utilisée à la place de l'Arduino Uno, ou vice versa, l'image ci-dessous montre la correspondance des broches entre les deux.

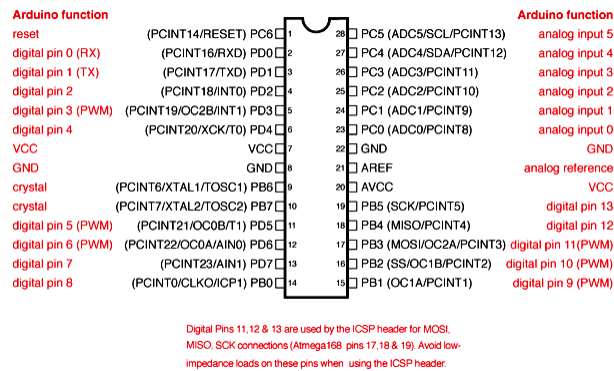


FIGURE 4.2 – Arduino Uno à ATmega328 Pin Mapping

## b) Logiciels

Arduino IDE (Integrated Development Environment) est nécessaire pour programmer la carte Arduino Uno.

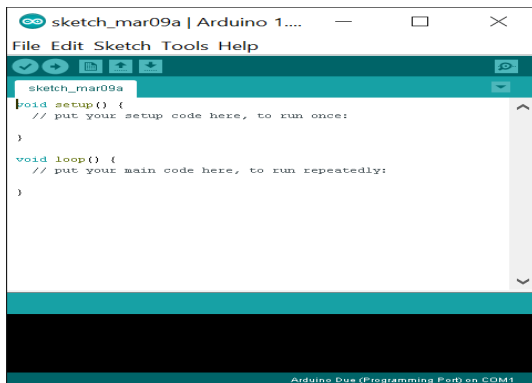


FIGURE 4.3 – Arduino IDE (Integrated Development Environment)

## c) Applications

- Prototypage de produits et systèmes électroniques
- Plusieurs projets de bricolage.
- Facile à utiliser pour les bricoleurs et les fabricants de niveau débutant.
- Projets nécessitant plusieurs interfaces E/S et communications.

#### d) Modèle Arduino Uno 2D

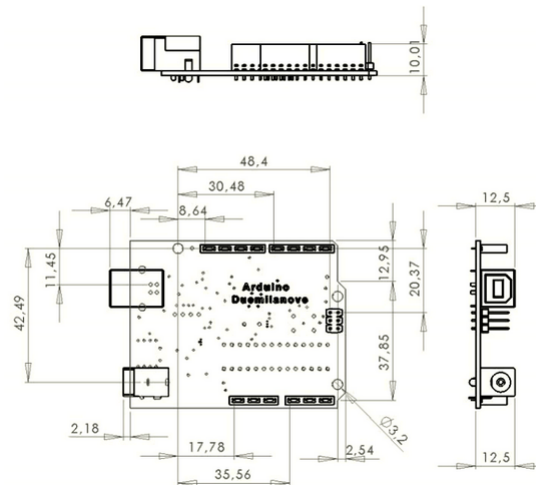


FIGURE 4.4 – Modèle Arduino Uno 2D

#### 4.2.2 MG996R Couple élevé Servo à double roulement à billes pour engrenage métallique

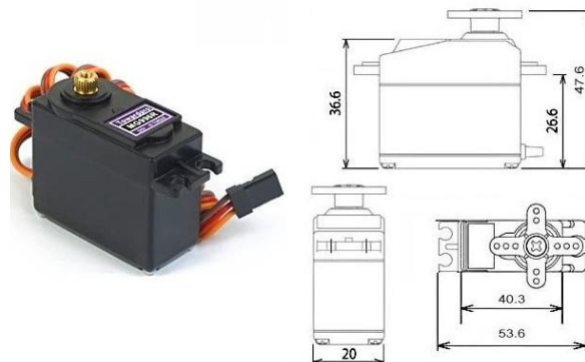


FIGURE 4.5 – Servomoteur MG996R

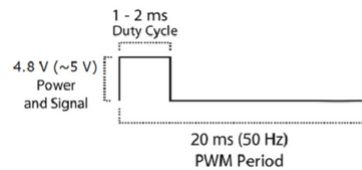
Le MG996R est un servomoteur à engrenages métalliques avec un couple de décrochage maximum de 11 kg/cm. Comme les autres servomoteurs RC, le moteur tourne de 0 à 180 degrés en fonction du rapport cyclique de l'onde PWM fournie à sa broche de signal.

#### a) Spécifications

- Poids : 55 g
- Dimension : 40,7 x 19,7 x 42,9 mm environ.
- Couple de décrochage : 9,4 kg cm (4,8 V), 11 kg cm (6 V)
- Vitesse de fonctionnement : 0,17 s/60° (4,8 V), 0,14 s/60° (6 V)
- Tension de fonctionnement : 4,8 V a 7,2 V
- Courant de fonctionnement 500 mA - 900 mA (6V)

- Courant de décrochage 2,5 A (6V)
- Largeur de la bande morte : 5  $\mu$ s
- Conception de double roulement à billes stable et résistant aux chocs
- Plage de température : 0 °C - 55 °C

b) **Comment contrôler la direction du moteur ?**



D'après l'image, nous pouvons comprendre que le signal PWM produit doit avoir une fréquence de 50 Hz, c'est-à-dire que la période PWM doit être de 20 ms. La durée de fonctionnement peut donc varier de 1 à 2 ms. Ainsi, lorsque le temps de fonctionnement est de 1 ms, le moteur sera à 0 et à 1,5 ms, il sera à 90, de même à 2 ms, il sera à 180. Ainsi, en faisant varier le temps de marche de 1 ms à 2 ms, le moteur peut être contrôlé de 0 à 180.

### 4.2.3 Joystick Arduino PS2

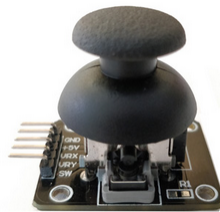


FIGURE 4.6 – Joystick Arduino PS2

Le joystick de style PS2 est un dispositif actionné par le pouce qui, lorsqu'il est utilisé de manière créative, offre un moyen pratique d'obtenir des informations de l'opérateur. Il se compose essentiellement de deux potentiomètres et d'un bouton-poussoir. Les deux potentiomètres indiquent la direction dans laquelle le potentiomètre est enfoncé, et l'interrupteur envoie un signal bas (ou de masse) lorsque le bouton de la manette est enfoncé.

a) **Brochage du joystick Arduino PS2**

Ce périphérique d'entrée s'interface avec votre Arduino via cinq broches. Trois d'entre elles sont des entrées pour votre Arduino, tandis que les deux autres fournissent la tension d'alimentation et la terre.

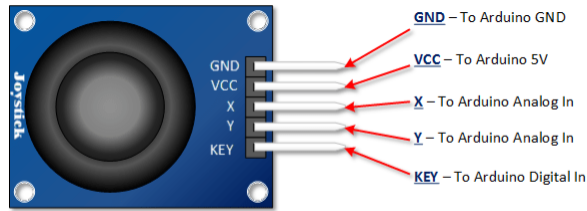


FIGURE 4.7 – Brochage du joystick Arduino PS2

## b) Schéma du joystick Arduino PS2

Comme vous pouvez le voir dans le schéma ci-dessous, la déviation complète d'un potentiomètre dans l'une ou l'autre direction fournira la terre ou la tension d'alimentation comme sortie.

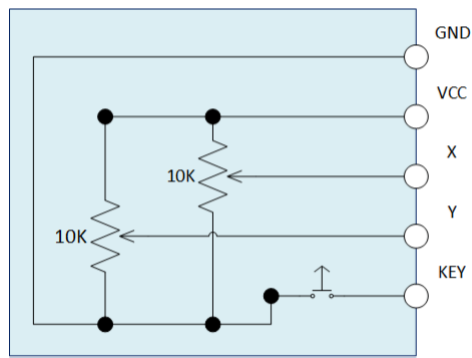


FIGURE 4.8 – Schéma du joystick Arduino PS2

## c) Orientation de la sortie du joystick Arduino PS2

Pour pouvoir utiliser cette commande au pouce, vous allez vouloir comprendre quelle direction est X et quelle direction est Y. Vous devrez également déchiffrer la direction dans laquelle elle est poussée, soit dans la direction X, soit dans la direction Y.

Dans ce tutoriel, nous utilisons des entrées analogiques pour mesurer la position du joystick. Les entrées analogiques ont fourni des indications qui se situent entre 0 et 1023.

Le graphique ci-dessous montre les directions X et Y et donne également une indication de la façon dont les sorties réagiront lorsque le joystick est poussé dans différentes directions. N'oubliez pas que le graphique que vous voyez est basé sur mon modèle Deek-Robot et peut en fait différer un peu du vôtre. Si c'est le cas, expérimentez un peu et dessinez votre propre croquis pour que les orientations soient claires.

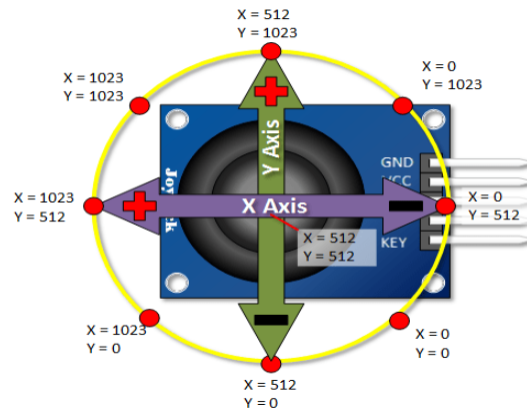
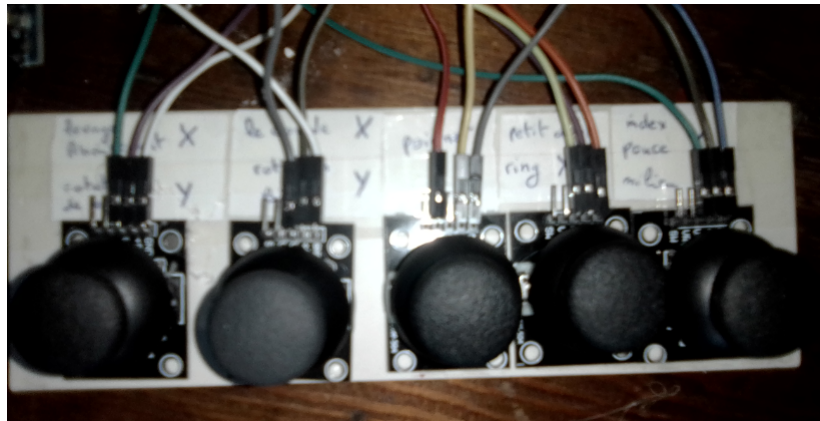
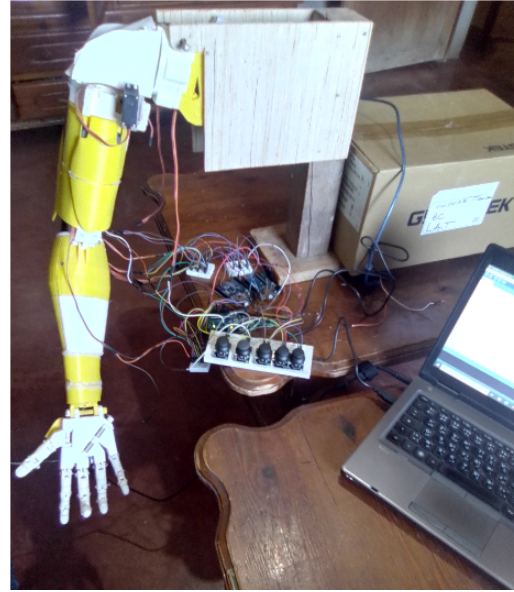
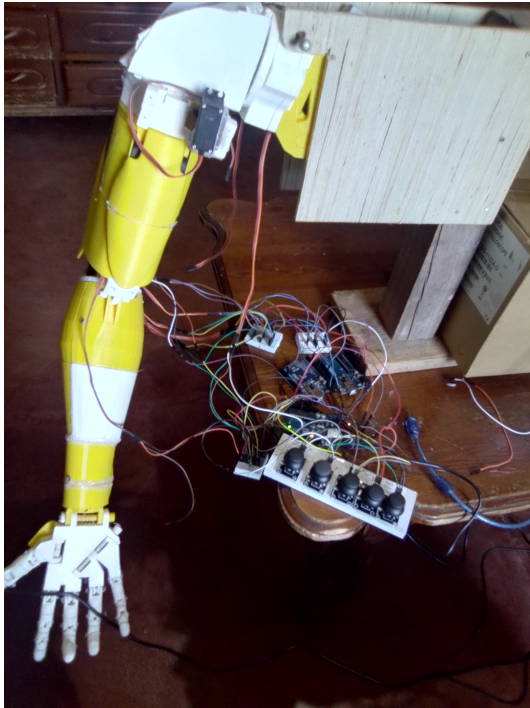


FIGURE 4.9 – Orientation de la sortie du joystick Arduino PS2

#### 4.2.4 Le programme de bras robotique



Le bras contient 10 servo motor, 5 servo pour les doigts en utilise 2 joystick pour le controlé sur l'axe  $X$ , 1 joystick controle le petit doigt, ring et milieu et l'autre pour le controle de index et pouce ; 1 joystick pour controler la rotation de poignet sur l'axe  $Y$  ; et aussi un joystick pour controler le mouvement de coude sur l'axe  $X$  et sur l'axe  $Y$  la rotation de bicep et pour plus précis la rotation de tout le bras depuis ce point ; et finalement un joystick pour controler la rotation de l'épaul sur l'axe  $Y$  et pour contrôler le mouvement de levage et d'abaissement de bras sur l'axe  $X$



En utilise 2 Arduino Uno l'un pour controler les doigts et le poignet et l'autre pour controler le mouvement des membres supérieures (coude ,rotation de bicep , rotation de l'épaul ,levage et d'abaissement de bras)



a) L'organigramme

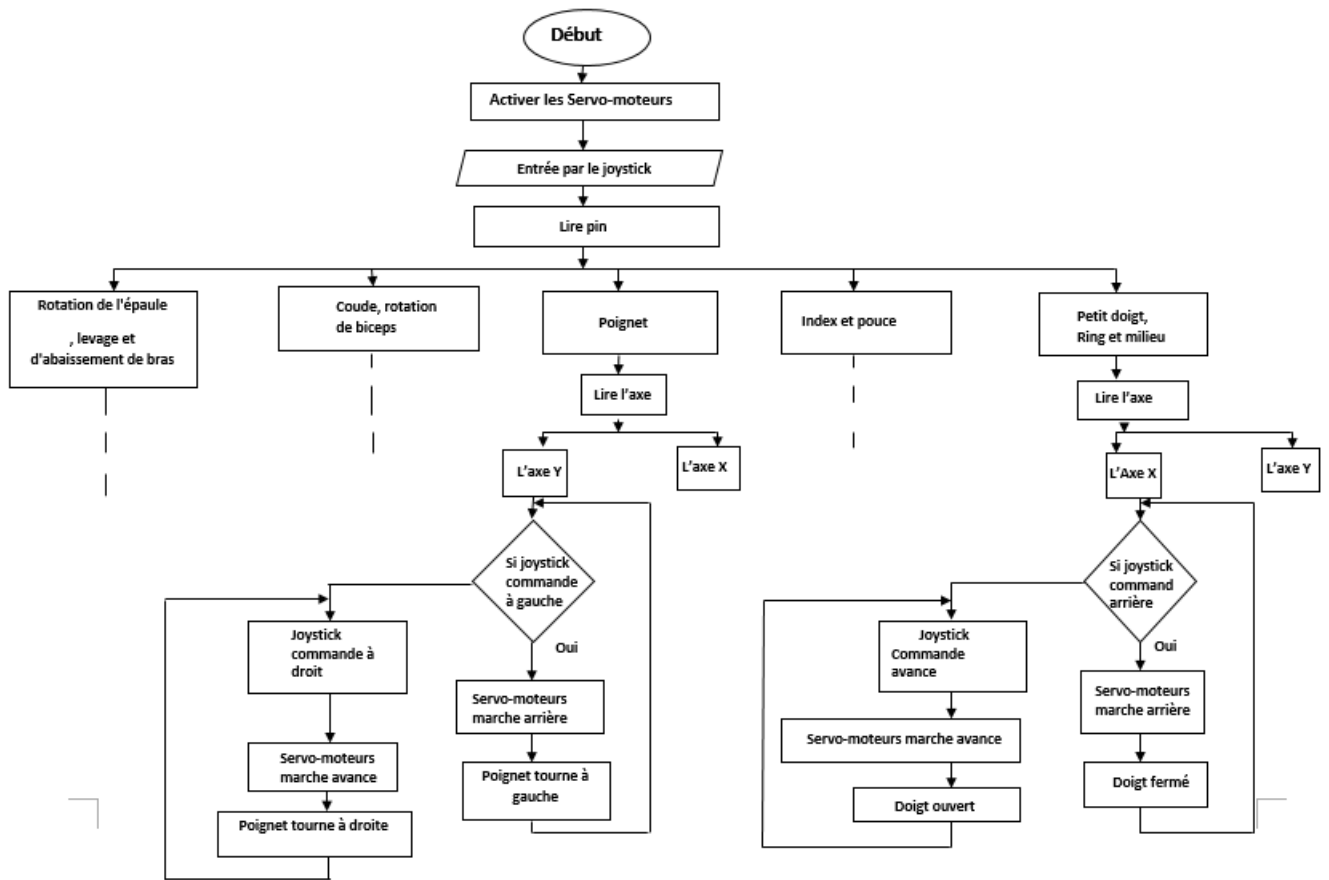


FIGURE 4.10 – L'organigramme de mouvement de bras

**Remarque :** Pour l'index et pouce leur organigramme est le même que les autres doigts et pour les autres mouvements de bras est leur continuation de l'organigramme et le suivant :

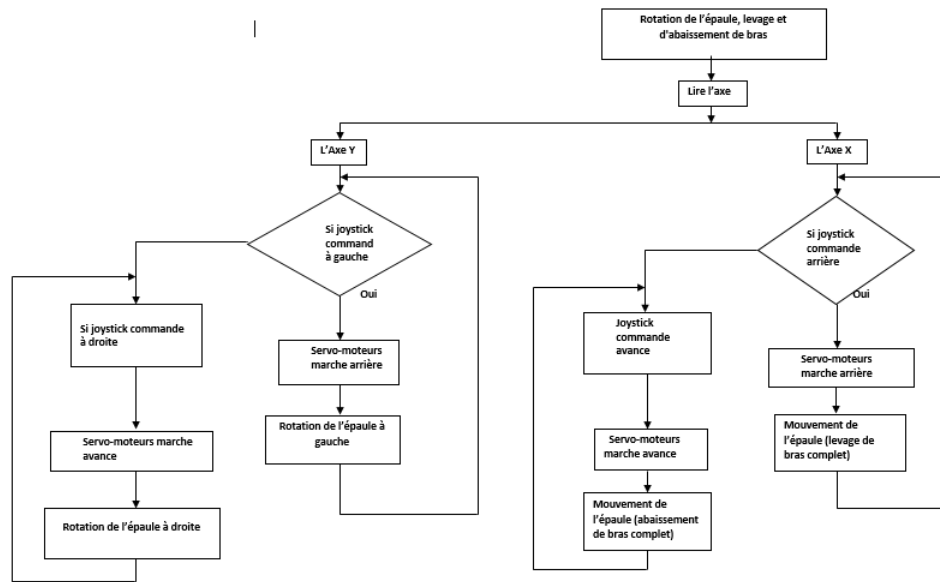


FIGURE 4.11 – Continuation de l’organigramme de mouvement du bras

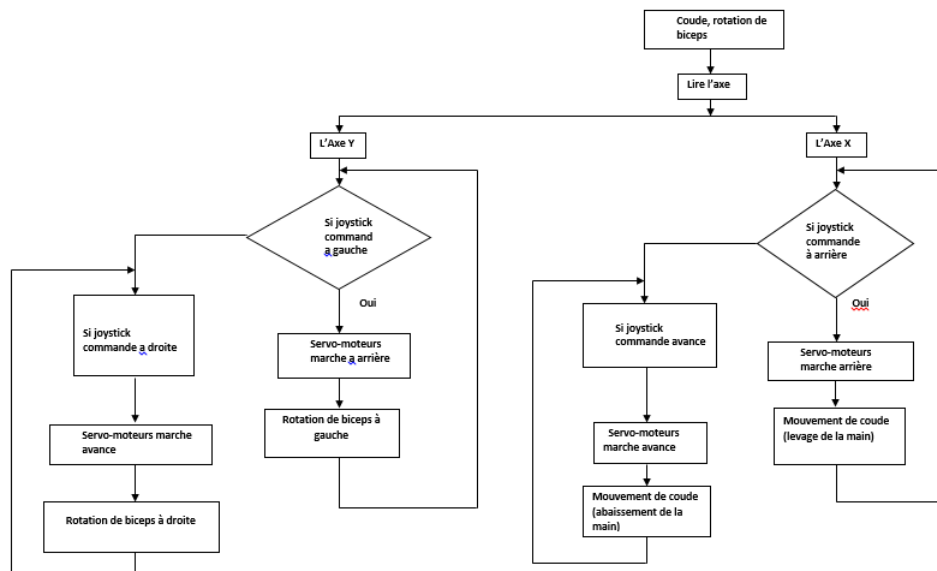


FIGURE 4.12 – Continuation de l’organigramme de mouvement de bras

**Remarque :** Nous avons contrôlé les doigts, le poignet et les membres supérieurs avec deux programmes, c’est-à-dire 2 arduino juste pour éviter la complication des circuits dans le bras.

### 4.3 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre la partie électronique du bras robotique .Afin d’augmenter les performances et l’autonomie du bras , il s’est monté les différents capteurs extéroceptifs pouvant être dotés dans notre robot. les capteurs et les actionneurs

du système sont gérés par le pilote électro-informatique Arduino qui joue le rôle du servo du système.

# Chapitre 5

## Expérimentation et résultat

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse cinématique et une simulation de mouvements informatiques de la main robotisée et son utilisation comme main prothétique.

### 5.2 Modèle cinématique de la main

La main humaine est une structure très articulée. La grande fonctionnalité de la main humaine est basée sur les degrés de liberté les plus élevés. La main humaine a 23 DOF qui sont fournis par 17 articulations. Si l'on prend en considération les mouvements tridimensionnels, les degrés de liberté passent à 29 en raison de l'orientation et de la variation de la position de la main. L'articulation d'une main de robot à plusieurs doigts est illustrée sur la figure suivant

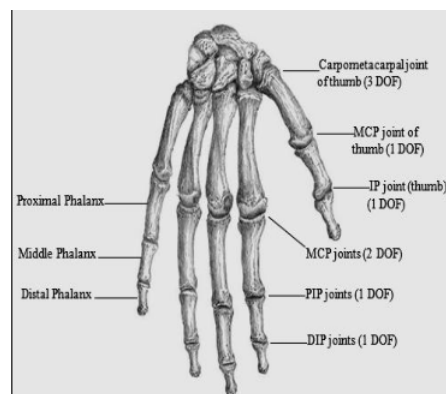


FIGURE 5.1 – Structurer la main humaine

Les phalanges sont les petits os qui constituent le squelette des doigts et du pouce. La phalange la plus proche du corps de la main est appelée phalange "proximale" et celle qui se trouve à l'extrémité de chaque doigt est appelée phalange "distale". Les articulations du doigt, l'articulation interphalangienne distale (DIP) et l'articulation interphalangienne proximale (PIP) ont 1 ddl en raison du mouvement de rotation et l'articulation métacarpophalangienne (MCP) a 2 ddl en raison des mouvements

d'adduction-abduction et de rotation. À l'exception du pouce, les quatre autres doigts (index, majeur, annulaire et petit doigt) ont une structure similaire en termes de caractéristiques cinématiques et dynamiques. Le pouce est la structure physique la plus complexe parmi les doigts de la main et se distingue des doigts par le fait qu'il ne contient que deux phalanges et qu'il a 5 ddl

Le modèle de main prothétique analysé ici est basé sur le squelette humain. Cependant, il dispose de simplifications. Alors que le modèle de la main humaine réelle a plus de 20ddl, le modèle présenté ici comprend 12 coudes qui simulent les os humains correspondants, et 17ddl qui représentent les articulations. La notation utilisée dans le modèle considère que  $l_{i,j}$  et  $\theta_{i,j}$ , respectivement, sont des liens et des articulations, où  $i$  représente un finger et  $j$  représente une articulation ou un lien correspondant comme indiqué au tableau 5.1.

les articulations	petit doigt (L)	Anneau (R)	Majeur (M)	Index (I)	Pouce (T)
Interphalangienne distale (DIP)	$\theta_{L,DIP}$	$\theta_{R,DIP}$	$\theta_{M,DIP}$	$\theta_{I,DIP}$	--
Interphalangienne proximale (PIP)	$\theta_{L,PIP}$	$\theta_{R,PIP}$	$\theta_{M,PIP}$	$\theta_{I,PIP}$	--
Métacarpophalangienne (MCP)	$\theta_{L,MCP}$	$\theta_{R,MCP}$	$\theta_{M,MCP}$	$\theta_{I,MCP}$	$\theta_{T,MCP}$
Carpométacarpienne (CMC)	$\theta_{L,CMC}$	$\theta_{R,CMC}$	--	--	--
Interphalangienne (IP)	--	--	--	--	$\theta_{T,IP}$
Trapézométacarpienne (TMC)	--	--	--	--	$\theta_{T,TMC}$

liens	petit doigt (L)	Anneau (R)	Majeur (M)	Index (I)	Pouce (T)
Métacarpienne (MC)	$l_{L,MC}$	$l_{R,MC}$	--	--	$l_{T,MC}$
Proximale (P)	$l_{L,P}$	$l_{R,P}$	$l_{M,P}$	$l_{I,P}$	$l_{T,P}$
Majeur (M)	$l_{L,M}$	$l_{R,M}$	$l_{M,M}$	$l_{I,M}$	--
Distale (D)	$l_{L,D}$	$l_{R,D}$	$l_{M,D}$	$l_{I,D}$	$l_{T,D}$

TABLE 5.1 – Notation des articulations et des liens dans le modèle

Par conséquent, en supposant ce configuration, le pouce ( $T$ ), l'index ( $I$ ) et le milieu ( $M$ ) fingers ont 3 articulations et 3 liens chacun tandis que l'anneau ( $R$ ) et le petit ( $L$ ) fingers ont 4 articulations et 4 liens chacun, soit un total de 17 degrés de liberté ( $ddl$ ). Les  $ddl$   $\theta_{L,CMC}$  et  $\theta_{R,CMC}$  permettent de simuler l'arc de la paume, une sorte de déformation qui se produit lorsque la main prothétique saisit une balle ou tout autre objet similaire.

### 5.2.1 Convention Denavit-Hartenberg

Lorsque nous envisageons un nombre réduit de  $ddl$  dans la conception d'une prothèse de main, il est nécessaire d'améliorer le projet pour atteindre une meilleure manipulation des objets et des formes de manière efficace. Ainsi, la conception mécanique est un

aspect important qui nécessite une attention particulière et pour lequel la simulation peut être utile dans l'ensemble. La modélisation mathématique est une première étape pour établir une bonne simulation. Voici la description de la modélisation mathématique comprenant les aspects cinématiques des prothèses, c'est-à-dire l'étude du mouvement sans tenir compte de ce qui provoque le mouvement (Tarzimi et al., 2009). Les équations du modèle sont calculées au moyen de la convention Denavit-Hartenberg modified (Khalil e Kleinfinger, 1986) où les cadres reçoivent des étiquettes selon l'articulation où ils sont positionnés. Examinons les points suivants :

- l'axe  $Z$  d'un cadre générique, à savoir  $i$ , est appelé  $Z_i$ , qui coïncide avec l'articulation  $i$ .
- l'origine de  $i$  est située à l'endroit où le  $\alpha_i$  coupe perpendiculairement l'axe de l'articulation  $i$ .
- les paramètres qui mènent à define frame  $i$  auront  $(i)$  comme indice.
- conjoint  $(i)$  relie les liens  $i - 1$  et  $i$ .
- $X_i$  is the common perpendicular between  $Z_i$  and  $Z_{i+1}$ .

Nous ne considérons ici que les mouvements flexion et 3 cinématiques différentes configurations :

1. Pour le pouce, avec 3 articulations et 3 liens où les articulations trapéziométacarpiennes ont un cadre dont les axes ne sont pas mutuellement parallèles aux articulations métacarpophalangiennes et interphalangiennes (Fig. 5.3).
2. Pour l'index et le milieu fingers ( $i = I, M$ ), également avec 3 joints et 3 liens, tous les axes des cadres sont mutuellement parallèles (Fig.5.4)
3. Pour l'anneau et le petit fingers ( $i = R, L$ ), avec 4 articulations et 4 liens, le cadre carpométacarpien  $CMC$  a des axes non mutuellement parallèles aux autres cadres (Fig. 5.5).

La figure 4 montre le modèle complet avec 5 fingers, 17 DoFs et un cadre général est positionné dans le poignet et les vecteurs  $u_L, u_R, u_M, u_I$  et  $u_T$  relient les cadres initiaux à chaque finger avec le référentiel central du poignet.

## 5.2.2 Cinématique direct

La solution cinématique avancée de chaque doigt sera attribuée à l'aide de matrices homogènes et sert à déterminer la position et l'orientation de le bout des doigts par rapport au système de coordonnées de base situé au centre du poignet. Les équations du modèle sont calculées au moyen des paramètres de Denavit-Hartenberg ( $D - H$ ) où la terminologie anatomique humaine a été utilisée pour décrire le modèle de la prothèse. En considérant les 3 configurations comme dans la section précédente, les paramètres D-H sont déterminés selon la convention Modifié proposée par Khalil e Kleinfinger (1986). Les variables du modèle, nommées  $\theta_{i,j}$ , représentent l'angle flexion dans chaque articulation. Dans tous les paramètres  $D - H$ , les indices  $i$  et  $j$  représentent, respectivement, les doigts et les articulations correspondantes. Après avoir défini les cadres selon la convention  $D - H$ , les paramètres  $\theta_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$ ,  $\alpha_{i,j}$  et  $r_{i,j}$  sont tels que :

- $\theta_i$  est l'angle entre  $X_{i-1}$  et  $X_i$  autour de l'axe  $Z_i$ .
- $d_i$  est la distance entre l'origine  $O_{i-1}$  et l'axe  $X_{i-1}$ .
- $\alpha_i$  est l'angle entre  $Z_{i-1}$  et  $Z_i$  autour de l'axe  $X_{i-1}$ .
- $r_i$  est la distance entre l'origine  $O_i$  et l'axe  $X_{i-1}$ .

Pour calculer la position bout du doigt, il faut considérer une articulation supplémentaire dont l'angle flexion est égal à zéro.

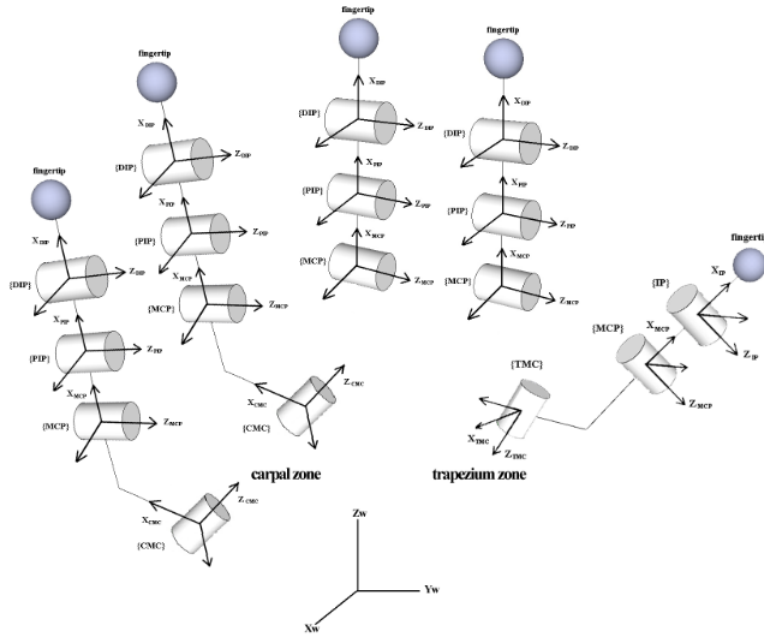


FIGURE 5.2 – Prothèse cinématique complète configuration

a) Cinématique du pouce doigt (thumb finger)

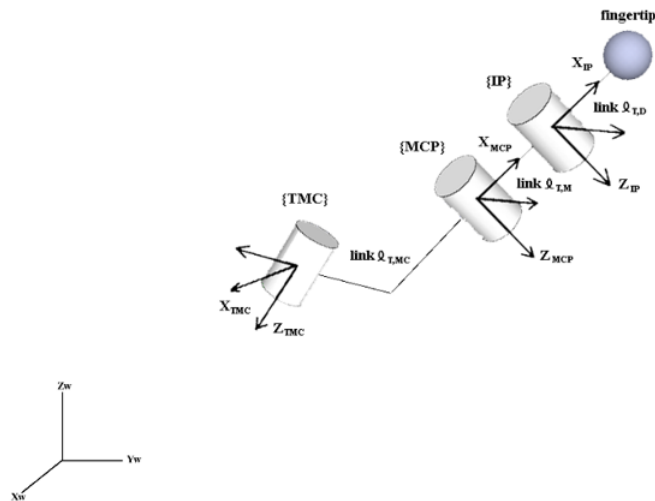


FIGURE 5.3 – Modèle pour le pouce

La cinématique en avant du pouce doigt est définie selon les paramètres du tableau 2, comme indiqué dans l'équation (5.1).

$$P_T = {}^w_0 T_T(r_{T,w}) {}^0_1 T_T(\theta_{T,TMC}) {}^1_2 T_T(\theta_{T,MCP}) {}^2_3 T_T(\theta_{T,IP}) {}^3_4 T_T(\theta_{T,D}) \quad (5.1)$$

Joint	$\theta_{i,j}$	$d_{i,j}$	$r_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$
W	0	0	$r_{T,w}$	0
1	$\theta_{T,TMC}$	0	$r_{T,MC}$	$\alpha_{T,MC}$
2	$\theta_{T,MCP}$	0	$r_{T,P}$	$\alpha_{T,P}$
3	$\theta_{T,IP}$	$d_{T,P}$	0	0
4	0	$d_{T,D}$	0	0

TABLE 5.2 – Les paramètres D-H de pouce doigt

Où  $P_T$  représente une matrice qui contient la position et l'orientation de la pointe du pouce par rapport au centre du poignet,  $T_T$  sont les matrices qui représentent la contribution en translation ou en rotation de chaque articulation, donnée sous une forme générale (Craig, 2004) par :

$${}^{k-1}_k T_T(\theta_{i,j}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i,j}) & -\sin(\theta_{i,j}) & 0 & d_{i,j} \\ \cos(\alpha_{i,j})\sin(\theta_{i,j}) & \cos(\alpha_{i,j})\cos(\theta_{i,j}) & -\sin(\alpha_{i,j}) & -r_{i,j}\sin(\alpha_{i,j}) \\ \sin(\alpha_{i,j})\sin(\theta_{i,j}) & \sin(\alpha_{i,j})\cos(\theta_{i,j}) & \cos(\alpha_{i,j}) & r_{i,j}\cos(\alpha_{i,j}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(a)$$

Où  $0 - 1 = w$  représentant le centre du poignet.  
Ainsi, chacune des matrices  $T_T$  sont données par :

$${}^w_0 T_T(r_{T,w}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{T,w} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{s-1}_s T_T(\theta_{T,j}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{T,j}) & -\sin(\theta_{T,j}) & 0 & 0 \\ \cos(\alpha_{T,v})\sin(\theta_{T,j}) & \cos(\alpha_{T,v})\cos(\theta_{T,j}) & -\sin(\alpha_{T,v}) & -r_{T,v}\sin(\alpha_{T,v}) \\ \sin(\alpha_{T,v})\sin(\theta_{T,j}) & \sin(\alpha_{T,v})\cos(\theta_{T,j}) & \cos(\alpha_{T,v}) & r_{T,v}\cos(\alpha_{T,v}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où  $s = 1, 2$ ;  $v = MC, P$  et  $j = TMC, MCP$ , dans cet ordre.

$${}^2_3 T_T(\theta_{T,IP}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{T,IP}) & -\sin(\theta_{T,IP}) & 0 & d_{T,P} \\ \sin(\theta_{T,IP}) & \cos(\theta_{T,IP}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$${}^3_4T_T(\theta_{T,D}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{T,D} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### b) Paramètres D-H pour l'index et le milieu doigt(index , middle)

Comme dans la section précédente, la cinématique de l'index et du milieu doigt est définie selon les paramètres du tableau (5.3), comme le montre l'équation (5.3) où  $\beta=I,M$ (Index, Middle).

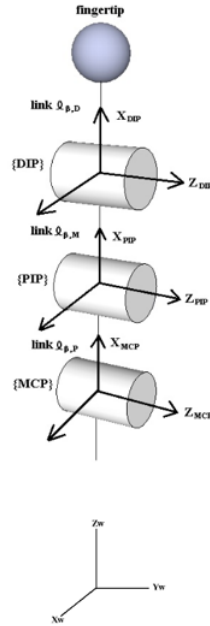


FIGURE 5.4 – Modèle pour l'index et le milieu doigt

Joint	$\theta_{i,j}$	$d_{i,j}$	$r_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$
$W$	0	0	$r_{\beta,w}$	0
1	$\theta_{\beta,MCP}$	0	$r_{\beta,MC}$	$\alpha_{\beta,MC}$
2	$\theta_{\beta,PIP}$	$d_{\beta,P}$	0	0
3	$\theta_{\beta,DIP}$	$d_{\beta,M}$	0	0
4	0	$d_{\beta,D}$	0	0

TABLE 5.3 – Les paramètres D-H de l'index et le milieu doigt

$$P_{\beta} = {}^w_0T_{\beta}(r_{\beta,w}) {}^0_1T_{\beta}(\theta_{\beta,MCP}) {}^1_2T_{\beta}(\theta_{\beta,PIP}) {}^2_3T_{\beta}(\theta_{\beta,DIP}) {}^3_4T_{\beta}(\theta_{\beta,D}) \quad (5.2)$$

Où  $P_\beta$  représente les matrices qui contiennent la position et l'orientation de l'index et du milieu doigt par rapport au centre du poignet,  $T_\beta$  sont les matrices comme celle indiquée dans l'équation (a), donnée par :

$${}^wT_\beta(r_{\beta,w}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{\beta,w} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nous le supposons :

$$\begin{aligned} c(\theta_{\beta,MCP}) &= \cos(\theta_{\beta,MCP}) \\ s(\theta_{\beta,MCP}) &= \sin(\theta_{\beta,MCP}) \end{aligned}$$

$${}^0T_\beta(\theta_{\beta,MCP}) =$$

$$\begin{bmatrix} c(\theta_{\beta,MCP}) & -s(\theta_{\beta,MCP}) & 0 & 0 \\ c(\alpha_{\beta,MCP})s(\theta_{\beta,MCP}) & c(\alpha_{\beta,MCP})c(\theta_{\beta,MCP}) & -s(\alpha_{\beta,MCP}) & -r_{\beta,MCP}s(\alpha_{\beta,MCP}) \\ s(\alpha_{\beta,MCP})s(\theta_{\beta,MCP}) & s(\alpha_{\beta,MCP})c(\theta_{\beta,MCP}) & c(\alpha_{\beta,MCP}) & r_{\beta,MCP}c(\alpha_{\beta,MCP}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^s{}^{-1}T_\beta(\theta_{\beta,j}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\beta,j}) & -\sin(\theta_{\beta,j}) & 0 & d_{\beta,v} \\ \sin(\theta_{\beta,j}) & \cos(\theta_{\beta,j}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où  $s = 2, 3$ ;  $j = PIP, DIP$  et  $v = P, M$ , dans cet ordre.

$${}^3T_\beta(\theta_{\beta,D}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{\beta,D} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### c) Paramètres D-H pour l'anneau et le petit doigt (ring , little fingers)

Pour l'anneau et le petit doigt, la cinématique de l'avant est définie selon les paramètres du tableau 4, en rappelant que pour ce configuration nous avons 4 articulations et 4 liens. L'équation (5.4) donne les matrices qui contiennent la position et l'orientation de l'anneau et de la petite doigt par rapport au centre du poignet, où  $= R, L$  (anneau, petite).

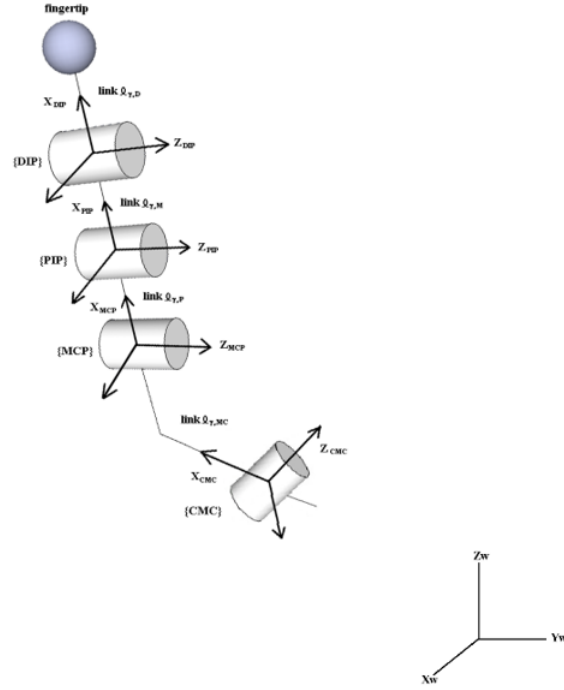


FIGURE 5.5 – Modèle pour la bague et le petit doigt

Joint	$\theta_{i,j}$	$d_{i,j}$	$a_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$
W	0	0	$r_{\gamma,w}$	0
1	$\theta_{\gamma,CMC}$	0	$r_{\gamma,MC}$	$\alpha_{\gamma,MC}$
2	$\theta_{\gamma,MCP}$	0	$r_{\gamma,P}$	$\alpha_{\gamma,P}$
3	$\theta_{\gamma,PIP}$	$d_{\gamma,P}$	0	0
4	$\theta_{\gamma,DIP}$	$d_{\gamma,M}$	0	0
5	0	$d_{\gamma,D}$	0	0

TABLE 5.4 – Les paramètres D-H de la bague et le petit doigt

$$P_{\gamma} = {}^w_0 T_{\gamma}(r_{\gamma,w}) {}^0_1 T_{\gamma}(\theta_{\gamma,CMC}) {}^1_2 T_{\gamma}(\theta_{\gamma,MCP}) {}^2_3 T_{\gamma}(\theta_{\gamma,PIP}) {}^3_4 T_{\gamma}(\theta_{\gamma,DIP}) {}^4_5 T_{\gamma}(\theta_{\gamma,D}) \dots (4) \quad (5.3)$$

Ici,  $P_{\gamma}$  représente les matrices qui contiennent la position et l'orientation de l'anneau et du petit doigt par rapport au centre du poignet ;  $T_{\gamma}$  sont les matrices comme Eq. (a), données par :

$${}^w_0 T_{\gamma}(r_{\gamma,w}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{\gamma,w} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^s T_\gamma(\theta_{\gamma,j}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\gamma,j}) & -\sin(\theta_{\gamma,j}) & 0 & 0 \\ \cos(\alpha_{\gamma,v})\sin(\theta_{\gamma,j}) & \cos(\alpha_{\gamma,v})\cos(\theta_{\gamma,j}) & -\sin(\alpha_{\gamma,v}) & -r_{\gamma,v}\sin(\alpha_{\gamma,v}) \\ \sin(\alpha_{\gamma,v})\sin(\theta_{\gamma,j}) & \sin(\alpha_{\gamma,v})\cos(\theta_{\gamma,j}) & \cos(\alpha_{\gamma,v}) & r_{\gamma,v}\cos(\alpha_{\gamma,v}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où  $s = 1, 2$ ;  $v = MC, P$  et  $j = CMC, MCP$ , dans cet ordre.

$${}^h T_\gamma(\theta_{\gamma,k}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\gamma,k}) & -\sin(\theta_{\gamma,k}) & 0 & d_{\gamma,w} \\ \sin(\theta_{\gamma,k}) & \cos(\theta_{\gamma,k}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où  $h = 1, 2$ ;  $w = P, M$  et  $k = PIP, DIP$ , dans cet ordre.

$${}^4 T_\gamma(\theta_{\gamma,D}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{\gamma,D} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 5.3 Modèle cinématique des membres supérieurs

### 5.3.1 Convention de Denavit-Hartenberg

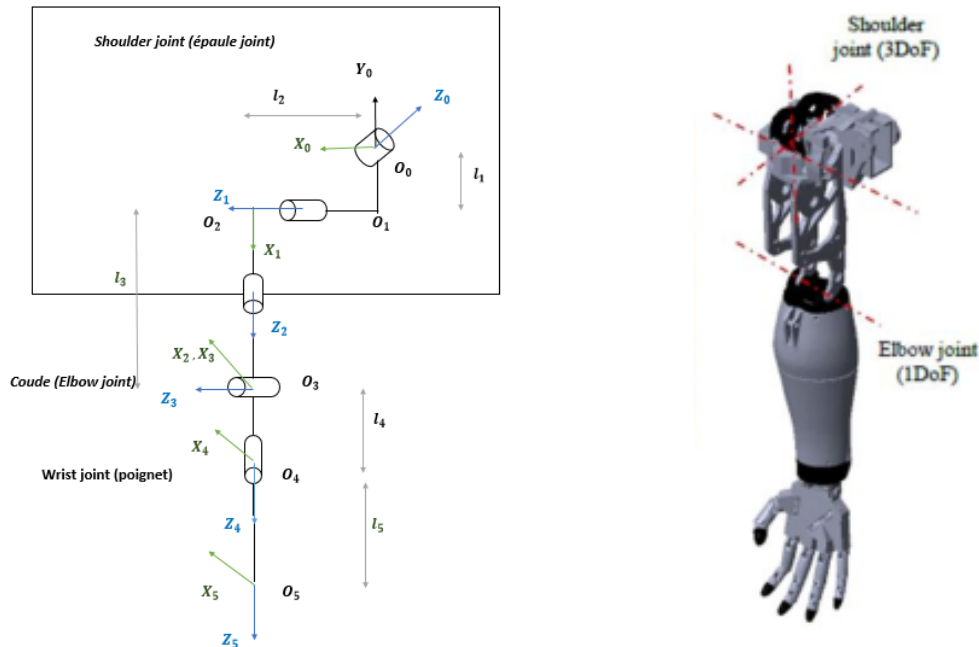


FIGURE 5.6 – Convention de Denavit-Hartenberg des membres supérieurs

a) Paramètre de D-H

<i>Joint</i>	$\theta_i$	$d_i$	$r_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1 - \frac{\pi}{2}$	0	$l_1$	$\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_2 + \frac{\pi}{2}$	$l_2$	0	$\frac{\pi}{2}$
3	$\theta_3$	$l_3$	0	$-\frac{\pi}{2}$
4	$\theta_4$	$l_4$	0	$\frac{\pi}{2}$
5	$\theta_5$	$l_5$	0	0

TABLE 5.5 – Paramètre de D-H des membres supérieurs

Où :  $l_1 = 52.98mm$  ,  $l_2 = 132.19mm$  ,  $l_3 = 275.85mm$

$$P_{MS} = {}^0_1 T_{MS}(\theta_1) {}^1_0 T_{MS}(\theta_2) {}^2_3 T_{MS}(\theta_3) {}^3_4 T_{MS}(\theta_5) \quad (5.4)$$

MS== membres supérieurs

Où  $P_{MS}$  représente les matrices qui contiennent la position et l'orientation de membres supérieurs ,  $T_{MS}$  sont les matrices comme celle indiquée dans l'équation (a), donnée par :

$$\begin{aligned}
{}^0_1T_{MS}(\theta_1) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & -\sin(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ \cos(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & -\sin(\frac{\pi}{2}) & -l_1\sin(\frac{\pi}{2}) \\ \sin(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) & l_1\cos(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^1_2T_{MS}(\theta_2) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & l_2 \\ \cos(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2_3T_{MS}(\theta_3) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & l_3 \\ \cos(-\frac{\pi}{2})\sin(\theta_3) & \cos(-\frac{\pi}{2})\cos(\theta_3) & -\sin(-\frac{\pi}{2}) & 0 \\ \sin(-\frac{\pi}{2})\sin(\theta_3) & \sin(-\frac{\pi}{2})\cos(\theta_3) & \cos(-\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^3_4T_{MS}(\theta_4) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & l_4 \\ \cos(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_4) & \cos(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_4) & -\sin(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2})\sin(\theta_4) & \sin(\frac{\pi}{2})\cos(\theta_4) & \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^4_5T_{MS}(\theta_5) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & l_5 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

## 5.4 Modèle simulé de la main

Selon la taxonomie proposée par Cutkosky (1989), les prises sont divisées en prises de puissance et en prises de précision. Dans les prises de précision, la sensibilité et la dextérité sont prédominantes, tandis que les prises de puissance ont de grandes surfaces de contact entre l'objet saisi et les surfaces des doigts et de la paume, avec peu ou pas de capacité nécessaire pour effectuer des mouvements.

La figure suivant montre la prothèse sans flexion dans les articulations ( $i;j = 0$  à tous les  $i,j$ ) et une simulation pour cette situation dans le cadre du modèle mis en œuvre.

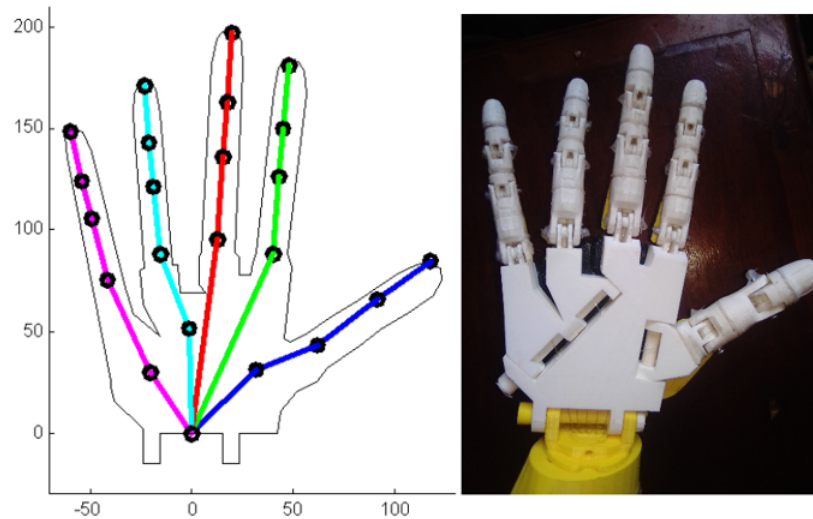


FIGURE 5.7 – Modèle simulé et prothèse sans flexion

La figure suivante présente une situation où l'index et le pouce sont entièrement fléchis au-dessus de ses articulations. On peut percevoir qu'il existe une difficulté géométrique pour effectuer des saisies de précision, principalement avec le pouce et l'index doigt. On ne considère pas ici l'analyse du contact entre les doigts.

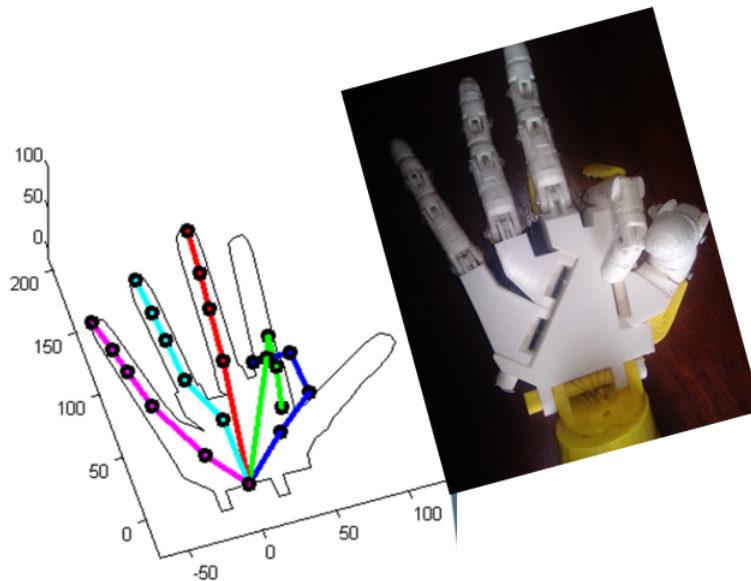


FIGURE 5.8 – Modèle et prothèse simulés avec des flexions complètes du pouce et de l'index

Enfin, la figure suivante montre la prothèse entièrement fléchie (angles maximaux de chaque articulation) et sa situation modélisée correspondante.

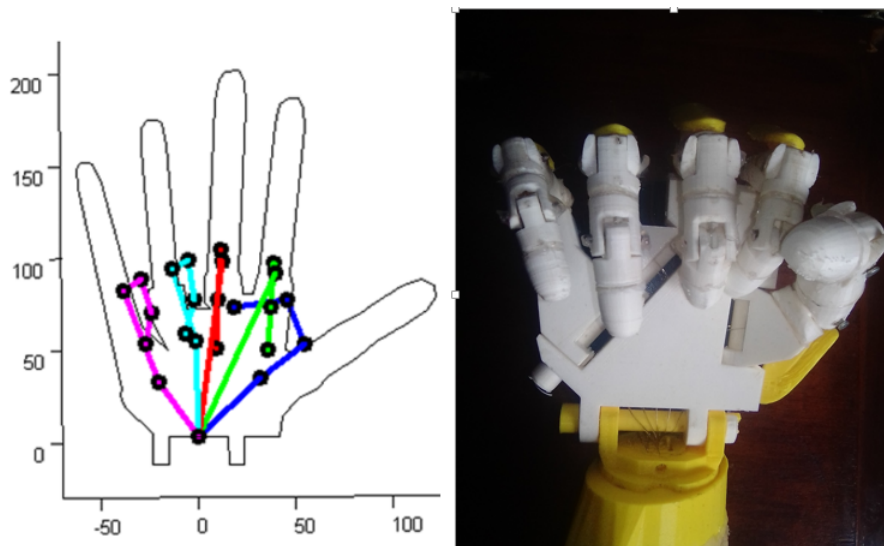


FIGURE 5.9 – Modèle de flexion et prothèse entièrement simulés

## 5.5 Les mouvement des membres supérieurs

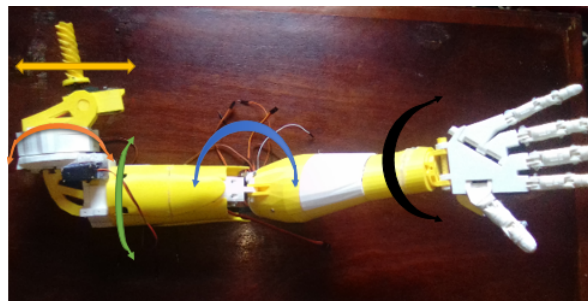


FIGURE 5.10 – Les mouvement des membres supérieurs

## 5.6 Les différents types de mouvements de la main

En ce qui concerne les mouvements, ces sept différentes positions nous ont été choisies parce qu'elles sont fondamentales et utiles pour effectuer les opérations souhaitées : principalement pointer et saisir. Une brève description et une image de chaque mouvement seront abordées.

- Référence : simulation d'une position naturelle et détendue. Les doigts sont légèrement fléchis comme le montre la figure .
- Ouvert : tous les doigts sont étendus au maximum.
- Fermé : tous les doigts sont fléchis au maximum. C'est la position pour saisir des objets comme on peut l'observer sur la figure
- Supination : seul le poignet tourne à 0 degré et le reste des doigts ne bougent pas. La paume de la main est tournée vers le haut.
- Pronation : exactement l'opposé de la supination. La paume est tournée vers le bas.



- Index : tous les doigts, sauf l'index, sont fléchis. L'index étendu est utile pour pointer.
- Pince à épiler : l'index et le pouce sont fléchis pour être en contact. Le reste des doigts est étendu. Cette position permet à l'utilisateur de prendre de petits objets.



FIGURE 5.11 – Position de référence

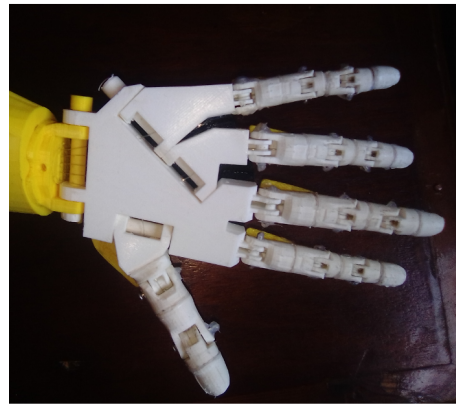


FIGURE 5.12 – Position ouverte



FIGURE 5.13 – Position fermée

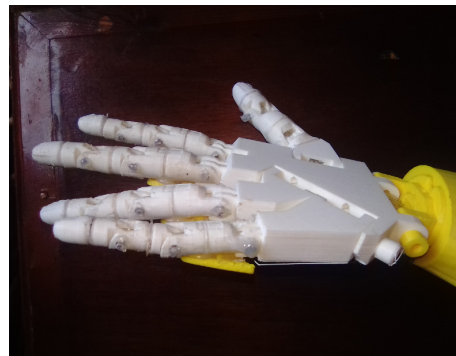


FIGURE 5.14 – Position de supination



FIGURE 5.15 – Position de pronation



FIGURE 5.16 – Position dans l'index



FIGURE 5.17 – Position de la pince à épiler

Sans oublier les autres mouvements importants tels que la saisie de différents objets



FIGURE 5.18 – Saisir différents objets

La principale application de la main robotique humanoïde n'est pas seulement la robotique mais aussi la prothèse de la main perdue.

Le monde des prothèses, bien que très ancien, est en plein essor. Les technologies disponibles aujourd'hui et l'évolution des systèmes de santé dans le monde entier sont des facteurs qui favorisent cette effervescence. Nous sommes loin de la jambe de bois et du crochet des marins du XVIIe siècle.

La fonction d'une prothèse est aussi diverse que la partie du corps humain qu'elle est destinée à remplacer, pour cela à titre d'essai commander à la main de faire des gestes plus utilisables et compréhensibles.

Le type de gestes qu'une main peut effectuer sera limité par la conception physique de la main. Pour tester les capacités gestuelles requises par la main, nous avons mis au point un ensemble de gestes compréhensibles par l'homme les plus couramment utilisés sur le site five, qui ne nécessite pas de parcourir le site fingers. Ces gestes sont les suivants : dire "salut" en utilisant une paume ouverte verticalement, pointer en utilisant l'index finger, signaler "ok" en utilisant l'index finger et le pouce, signaler "approbation" en levant le pouce, signer un signal de "paix" en étendant seulement l'index et le milieu finger.

les figures suivants représentent Figures de five gestes humains compréhensibles effectués par la main imprimée en 3D à l'état de "Geste"

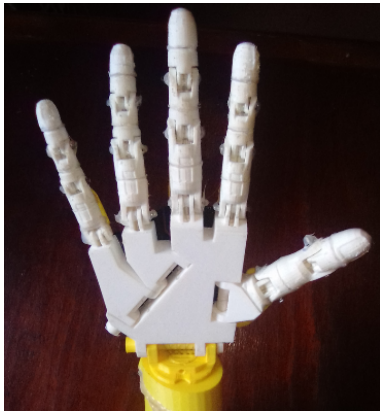


FIGURE 5.19 – (a) Dire "salut" en utilisant la main ouverte verticale



FIGURE 5.20 – (b) Signaler "ok" en utilisant l'index et le pouce



FIGURE 5.21 – (c) Signer un signal de "peace" en utilisant l'index et le milieu finger

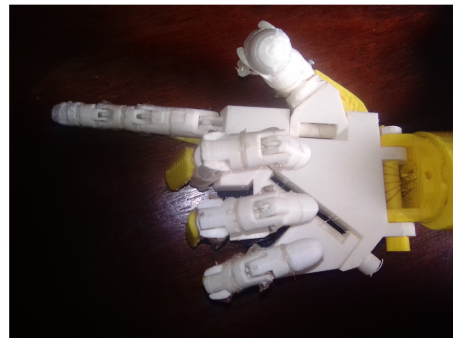


FIGURE 5.22 – (d) Geste de pointage en utilisant l'index finger



FIGURE 5.23 – (e) Signaler l’approbation en levant le pouce

## 5.7 Conclusion

Des recherches sur les mains robotisées à doigts multiples sont menées pour permettre une variété de tâches telles que la préhension et la manipulation d’objets dans le domaine des applications industrielles, des robots de service et des robots de réadaptation. Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur le bras humanoïde qui se base sur l’équivalent biologique de la main humaine, car la modélisation mathématique joue un rôle important dans la simulation de la main du robot multidoigt

# Chapitre 6

## Conclusion générale

Ce mémoire de Master présente la imprésion 3D et l'assemblage d'un bras humanoïde. Ce bras peut faire des mouvements diverses et cela grâce à l'utilisation d'une conception proche de l'être humain et aussi d'une carte électronique fiable..

Pour parvenir au bout de notre travail, nous avons organisé notre mémoire en cinq chapitres :

- Le premier chapitre introduit les généralités sur la robotique et les humanoïdes.
- Le deuxième chapitre permet de comprendre la modélisation géométrique et cinématique.
- Le troisième chapitre explique comment on a imprimer en 3D et structurer notre modèle.
- Et la quatrième chapitre représent Architecture du système et programmation , qui traite la partie commande de ce modèle par le module Arduino.
- et pour la dernière chapitre c'est Expérimentation et résultat (modèle cinématique de la main et des membres supérieurs ,et quel que étude sur hand robotique)

Les résultats ont démontré la faisabilité du projet avec toutes ses spécifications. Sa configuration et sa taille sont anthropomorphiques avec cinq doigts comptant sur le pouce opposable. L'ensemble du processus peut être réalisé avec l'imprimante 3D, ce qui rend le produit final entièrement accessible. Ainsi, le passage à la production de masse de prothèses basées sur ce modèle facile à acquérir serait acceptable.

Le besoin d'améliorer le bras humanoïde découle du désir de manipuler plus efficacement les objets et les formes. Par conséquent, la conception mécanique joue un rôle important. La simulation facilite le processus de contrôle sans passé par le modèle réel tout en évitant des éventuels risques de dommage.. La modélisation mathématique est un atout pour établir la simulation. Une modélisation mathématique comprenant les aspects cinématiques et dynamiques du bras humanoïde doit être établie. La cinématique est l'étude du mouvement sans tenir compte de ce qui cause le mouvement, tandis que Dynamique décrit les relations entre différentes versions temporelles du mouvement de la main et la force génératrice de mouvement sur la main.

Dans ce mémoire, la mise en œuvre d'un robot manuel est expliquée. Une main robotique humanoïde de cinq doigts a été conçue, mise en œuvre et prototypée. Nombreux mouvement similaires de ceux réalisés par l'être humain ont été effectués en utilisant ce prototype. Le temps de réponse est très élevé pour que la main robotisée puisse faire

rapidement ce que l'opérateur veut. À l'avenir, les auteurs sont convaincus que cette application peut encore être améliorée pour les soins de santé, les applications militaires et les domaines de la prothétique. Cette application peut être améliorée par d'autres technologies et peut être utilisée facilement dans d'autres domaines.

**Perspectives :**

Le prototypage réalisé dans ce travail peut être étendu pour couvrir plusieurs tâches en différent disciple, notamment, la médecine, les centres nucléaires, l'espace, etc. Dans ces cas, notre robot doit imiter des taches provenant d'un autre dispositif porté par l'être humain jouant le rôle d'un maître/esclave. Notre future travail est d'utiliser des gants dotés des capteurs angulaires de chaque articulation des doigts pour faire bouger les doigts de la main robotique et un capteur inertiel pour faire déplacer l'ensemble main et bras en utilisant la cinématique inverse développer auparavant.

# Bibliographie

- [1] Moov » open-source 3D printed life-size robot, 2014 [online], Available at : <http://www.inmoov.fr>. [Accessed 01st June 2014].
- [2] ritt van Bergen ,Oliver Heijster,Ana Sánchez,Niki Kuhar,Brent Van Obbergen,Jan Van De Ven ,FINAL REPORT,InMoov Humanoid Robot (Open-source project 3D printed life size robot), Novia University of Applied Science,2019
- [3] ouis-Alexis allen Demers, Synthèse, Optimisation et prototypage d'une main ropotique sous-actionnée a cinq doigts, Faculté des sciences et génie universté LAVAL QUÉBEC, 2011
- [8] ARTIN F. GUAY, Analyse cinémato-statique d'un doigt sous-actionné a 3 ddl pour une prothèse de memre supérieur , Faculté des sciences et génie universté LAVAL QUÉBEC, 2011
- [5] engiz Tezel, Korhan Kayisli, Ozan Gunay, Implementation of a Humanoid Robotic Hand ,INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND APPLICATION Tezel et al. ,Vol. 1, No. 4, 2017
- [6] gnacio Herrera-Aguilar. Commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III. 2007.
- [7] bdelkrim Bahloul. Sur la commande des robots manipulateurs industriels en co-manipulation robotique.Automatique / Robotique. Université Paris-Saclay, 2018.
- [8] ARK R. CUTKOSKY ,On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks ,IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 5, NO. 3. JUNE 1989
- [9] ean-Louis Boimond, cours Robotique , STIA, Université Angers.
- [10] uy Fierens, Stijn Huys, Jasper Slaets ,Master's thesis : Humanoid robot for sign language ,Faculty of Industrial Engineering ,university Antwerpen ,2014-2015

# Annexe A

## Programme de la main et poignet

```
# include _ <Servo.h_ >
const int X_pin = A0; // analog pin pour controle index et pouce
const int X1_pin = A1; // analog pin pour controle le petit doigt ,ring et milieu
const int Y_pin = A2; // analog pin pour controle poignet
Servo myservo;
Servo myservo1;
Servo myservo2;
int val;
int val1;
int val2;

void setup()
myservo.attach(9);
myservo1.attach(8);
myservo2.attach(7);

void loop()
val = analogRead(Y_pin);
val = map(val, 0, 1023, 0, 180);
myservo.write(val);
delay(15);

val1 = analogRead(X1_pin);
val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 180);
myservo1.write(val1);
delay(15);

val2 = analogRead(Y_pin);
val2 = map(val2, 0, 1023, 70, 180);
myservo2.write(val2);
delay(15);
```



# Annexe B

## Programme des membres supérieurs

```
# include _ <Servo.h_ >
const int X_pin = A0; // analog pin pour controler le coude
const int Y_pin = A1; // analog pin pour controler la rotation de bicep
const int X1_pin = A2; // analog pin pour controler levage et d'abaissement de bras
const int Y1_pin = A3; // analog pin pour controler rotation de l'épaul

Servo myservo;
Servo myservo1;
int val;
int val1;

void setup()

myservo.attach(9);
myservo1.attach(8);

void loop()

val = analogRead(X_pin);
val = map(val, 0, 1023, 0, 180);
myservo.write(val);

val = analogRead(Y_pin);
val = map(val, 0, 1023, 70, 180);
myservo.write(val);
delay(15);

val1 = analogRead(X1_pin);
val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 180);
myservo1.write(val1);
delay(15);

val1 = analogRead(Y1_pin);
```

```
val1 = map(val1, 0, 1023, 70, 180);  
myservo1.write(val1);  
delay(15);
```