

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة الدكتور مولاي الطاهر

Université de Saida Dr Tahar Moulay

Faculté des sciences et technologie



MEMOIRE

Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Génie Biomédical

Spécialité : instrumentation biomédicale

Par : OUIS Aicha

Sujet

**Commande d'un bras robotique (exosquelette)
manipulable par l'utilisateur pour réhabilitation**

Soutenue publiquement en **25/06/2025** devant le jury composé de :

Mr. SADOUKI Mohamed Reda	MCA	Univ. Saida	Président
Mr. BERBER Redouane	MCA	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. CHAMI Nadir	MCB	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier premièrement Dieu Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous à donner durant toutes ces longues années d'études. Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant monsieur **BERBER REDOUANE**, pour avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup d'attention et de disponibilité. Ce fut un réel plaisir de bénéficier à la fois de ses connaissances scientifiques et techniques mais aussi de ses qualités d'écoute et pédagogiques.

Nous remercions les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département d'électronique.

Enfin, Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous les amis et les collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

"وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا"

Je dédie ce modeste travail :

Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu tout au long de mon cursus.

À mes très chères sœurs et mes très chers frères

A toute ma famille

Et à tous mes enseignants

OUIS AICHA

Résumé :

Les exosquelettes robotiques ont émergé comme une solution prometteuse dans le domaine de la réhabilitation, notamment pour les personnes atteintes de handicaps moteurs. Notre dispositif, qui fonctionne comme une structure externe permettant de soutenir et d'améliorer les capacités physiques humaines, l'objectif de ce projet est de concevoir un bras robotique manipulable par l'utilisateur pour la réhabilitation, capable de s'adapter aux besoins individuels tout en offrant des séances de rééducation plus dynamiques, efficaces et adaptés aux besoins spécifiques de chaque utilisateur. Ce type de technologie non seulement améliore la mobilité des patients, mais peut également accélérer la récupération fonctionnelle en permettant un retour plus rapide à l'autonomie.

Mots-clés : bras robotique, exosquelette, réhabilitation, commande Arduino, servomoteur

ملخص :

الهياكل الخارجية الروبوتية حل واعد في مجال إعادة التأهيل، خاصةً للأشخاص الذين يعانون من إعاقات حركية. يهدف هذا المشروع إلى تصميم ذراع روبوتي يمكن للمستخدم التحكم فيه لإعادة التأهيل، ويعمل كهيكل خارجي لدعم وتعزيز القدرات البدنية للإنسان. يتميز الجهاز بقدرته على التكيف مع الاحتياجات الفردية، وتقديم جلسات علاجية أكثر ديناميكية وفعالية ومناسبة لكل مستخدم. هذا النوع من التكنولوجيا لا يُحسن فقط من حركة المريض، بل يُمكن أيضاً أن يُسرّع من عملية الاستشفاء الوظيفي ويساعد على العودة السريعة إلى الاستقلالية.

الكلمات المفتاحية: ذراع روبوتي، هيكل خارجي، إعادة التأهيل، تحكم أردوينو، محرك سيرفو

Abstract:

Robotic exoskeletons have emerged as a promising solution in the field of rehabilitation, particularly for individuals with motor disabilities. Our device, which functions as an external structure designed to support and enhance human physical abilities, aims to develop a robotic arm controllable by the user for rehabilitation purposes. It is designed to adapt to individual needs while providing more dynamic, effective, and personalized rehabilitation sessions. This type of technology not only improves patient mobility but can also accelerate functional recovery, allowing for a faster return to autonomy.

Keywords: robotic arm, exoskeleton, rehabilitation, Arduino control, servomotor

Sommaire

Résumé :

Sommaire _____

Liste des figures _____

Introduction générale _____ 1

Chapitre I :

L'état d'art sur les robots

I.1. Introduction _____ 4

1.2. Définition générale _____ 4

1.3. Historique _____ 4

1.4. Composants d'un système robotique _____ 6

I.4.1 Constituant d'un robot manipulateur _____ 7

I.4.1.1. La Base _____ 7

I.4.1.2. Segment (corps du robot) _____ 7

I.4.1.3. Organe terminal _____ 7

I.4.1.4. Effecteur _____ 7

I.4.1.5. Articulation _____ 8

1.5. Types des robots _____ 8

I.5.1. Robots mobiles _____ 8

I.5.2. Robots manipulateurs _____ 8

I.6. Classification des robots _____ 9

I.6.1. Point de vue fonctionnel _____ 9

I.6.1.1. Manipulateur à commande manuelle _____ 9

I.6.1.2 Manipulateur automatique _____ 10

I.6.1.3 Robots programmables _____ 10

I.6.1.4. Robots intelligents _____ 11

I.6.2. Point de vue géométrique _____ 11

I.6.2.1. Robots rectilignes _____ 12

I.6.2.2. Robots cylindriques _____ 12

I.6.2.3. Robots sphériques _____ 12

I.6.2.4. Robots articulés _____ 12

I.7. Domaine d'application _____ 12

I.7.1. Domaine industriel _____ 13

I.7.2. Domaine médical	13
I.7.3. Domaine agricole	14
I.7.4. Domaine militaire	15
I.7.5. Domaine spatial	15
I.7.6. Domaine des services	15
I.8. Avantages et inconvénients des robots	16
I.9. Conclusion	17
Référence chapitre I	18

Chapitre II :

L'exosquelette dans le domaine médical

II.1. Introduction	20
II.2. L'exosquelette dans le domaine médical :	20
II.2.1. La rééducation	20
II.2.2. Les exosquelettes pour personnes à mobilité réduite « d'assistance »	22
II.3. Capteurs de mouvement et de force utilisés en exosquelettes	27
II.3.1. Capteur Potentiométrique :	27
II.3.2. Électromyogramme (EMG)	27
II.3.3. Centrales inertielles (IMU : Inertial Measurement Unit)	27
II.4. Actionneurs adaptés	28
II.4.1 Moteur pas à pas :	28
II.4.2 Servomoteurs :	28
II.4.3 Microcontrôleur :	31
II.5 Conclusion :	32
Référence - Chapitre II :	33

Chapitre III :

Simulation et Conception d'un bras robotique type exosquelette

III.1. Introduction	36
III.2 Principe de conception :	36
III.3 Sélection des composants	37
III.3.1 La carte Arduino :	37
III.3.1.1 La carte Arduino UNO :	37
III.3.2 Servomoteur :	39
III.3.4 Plaque d'essai ou breadboard/protoboard :	40

III.3.5 Un bouton poussoir : _____	40
III.4 Réalisation électronique (simulation dans Proteus) : _____	41
III.4.1 Présentation du logiciel ISIS : _____	41
III.4.2 Schéma de notre circuit de commande sur Proteus : _____	42
III.4.3 Connexion des composants : _____	42
III.5 Organigramme de mode programmation _____	43
III.6 Guide de la commande du montage pour la rééducation : _____	45
III.7 Résultats de simulation : _____	47
III.7.I Comparaison entre un mouvement rapide et un mouvement progressif du bras dans le contexte de la rééducation _____	48
III.8 Comparaison entre le mode manuel et le mode automatique : _____	50
Référence -Chapitre III : _____	51
Conclusion générale _____	52
Annexes _____	54

Liste des figures

Figure I.1 : Historique des robots	6
Figure I.2: Les composants de système robotique.	6
Figure I.3 : Vocabulaire du robot	7
Figure.I.4 : Robot mobile	8
Figure.I.5 : Bras Manipulateur	9
Figure I.6 : Manipulateur à commande manuelle	10
Figure.I.7 : Manipulateur automatique	10
Figure.I.8 : Robot programmable	11
Figure.I.9 : Robot intelligent	11
Figure 1.10 : l'espace de travail des robots	12
Figure 1.11 : Bras soudeur d'ABB	13
Figure 1.12 : Robot Da Vinci	14
Figure 1.13 : robot utilisé en agriculture	14
Figure 1.14: Robot utilisé dans le domaine militaire	15
Figure 1.15 : Robot de service ASIMO	16
Figure II.1 (a) Lokomat (b) Lopes (c) ReoAmbulator	22
Figure II.2: exosquelettes Mobiles pour enfant	23
Figure II.3 (a) Le ReWalk™ [13], (b) le Indego® et (c) le Mina	25
Figure II.4 (a) Le HAL® [8], (b) le Rex® [2] et (c) le Ekso™ .	25
Figure II.5 (a) Le Keeogo™ [20], (b) le ARKE™ et (c) le Wandercraft .	26
Figure II.6 exosquelettes Adultes	26
Figure II. 7 : Symbole électrique et Image d'un potentiomètre	27
Figure II.8 : Schémas des éléments d'un servomoteur.	29
Figure II.9: Certains types du fils de servomoteur.	29
Figure II.10: Principe d'un servomoteur	30
Figure II.11 : donne des exemples de signaux pour 3 positions de l'axe de rotation.	31
Figure II.12 : Architecture simplifiée d'un microcontrôleur	32
Figure III.1 : structure et interface du bras avec des composants.	37
Figure III.2 : Carte Arduino UNO	38
Figure III.3 : Interface Logiciel Arduino IDE.	39
Figure III.4 : Servomoteur avec Arduino.	39

Figure. III.5 : Un potentiomètre avec Arduino.	40
Figure III.6: Branchement de bouton poussoir à Arduino	40
Figure.III.7. : Proteus, Écran du chargement et interface graphique	41
Figure.III.8. : schéma électronique du circuit de commande du bras robotique	42
Figure.III.9. : câblage du système et mise en place du potentiomètre	43
Figure.III.10. : photo du prototype réalisé	43
Figure.III.11. : utilisations réelle du bras robotique exosquelette	45
Figure.III.12. : Mouvement du bras lors de l'abaissement du poignet	46
Figure.III.13. : Mouvement du bras lors du soulèvement du poignet	46
Figure III. 14. Evolution de l'angle sous contrôle manuel à l'aide des boutons (affichage terminal et courbe de progression).	47
Figure III.15. Lecture angulaire d'une position enregistrée : (affichage terminal et courbe de progression).	47
Figure III.16. Lecture progressive de chaque position (45°,80°,120°)	48
FigureIII.17. Comparaison entre deux mouvements vers 80°.	49

Introduction générale

Les exosquelettes robotiques ont émergé comme une solution prometteuse dans le domaine de la réhabilitation, notamment pour les personnes atteintes de handicaps moteurs. Ces dispositifs, qui fonctionnent comme des structures externes permettant de soutenir et d'améliorer les capacités physiques humaines, sont de plus en plus utilisés dans des contextes médicaux pour assister les mouvements des patients. L'un des types d'exosquelettes les plus intéressants est celui conçu pour être manipulé directement par l'utilisateur, offrant ainsi une interaction plus intuitive et personnalisée.

L'exosquelette manipulable par l'utilisateur, en particulier, représente une avancée significative dans la réhabilitation physique. Ce système permet à l'utilisateur, par un contrôle direct et adapté, de récupérer des fonctions motrices perdues ou réduites. Il offre ainsi un moyen innovant de traiter des troubles moteurs liés à des pathologies telles que les AVC, les lésions de la moelle épinière, ou d'autres troubles neurologiques. Grâce à des capteurs de mouvement, des moteurs de précision et des algorithmes sophistiqués, l'exosquelette permet de guider les mouvements du patient tout en favorisant la rééducation et la stimulation des muscles et des articulations.

La commande de l'exosquelette peut être réalisée de plusieurs façons, en fonction de l'interface utilisateur choisie : commandes manuelles, capteurs de mouvement ou même commandes neuronales dans certains cas avancés. Cette capacité à interagir directement avec l'exosquelette ouvre de nouvelles perspectives dans le processus de réhabilitation, en rendant les exercices plus dynamiques et adaptés aux besoins spécifiques de chaque utilisateur.

L'objectif de ce projet est de concevoir un bras robotique manipulable par l'utilisateur pour la réhabilitation, capable de s'adapter aux besoins individuels tout en offrant des séances de rééducation plus efficaces. Ce type de technologie non seulement améliore la mobilité des patients, mais peut également accélérer la récupération fonctionnelle en permettant un retour plus rapide à l'autonomie.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Chapitre I - Etat de l'art : contient les généralités, où l'on présente la définition de la robotique, son historique et les différents types de robots manipulateurs en précisant leurs domaines d'utilisation.

Chapitre II – l'exosquelette dans le Domaine médical : Historique et applications des exosquelettes dans la réhabilitation. Étude des capteurs de mouvement et de force utilisés en rééducation (IMU, EMG, potentiomètres).

Chapitre III - Simulation et Conception d'un bras robotique type exosquelette : ce chapitre est la partie pratique de notre mémoire, qui présente la réalisation du bras manipulateur à base d'une carte Arduino (UNO).

Chapitre I :

L'état d'art sur les robots

I.1. Introduction

La robotique est l'union d'un groupe de sciences mécaniques, d'électronique et de programmation. Les roboticiens cherchent à faire fonctionner le robot automatiquement, en lui fournissant un ensemble d'appareils qui lui permettent de percevoir l'environnement dans lequel il se trouve et de prendre la décision appropriée et rationnelle dans le même environnement sans intervention humaine.

En fait, les robots ont progressivement envahi différents domaines d'activité. L'industrie est sans aucun doute celle qui profite le plus de cette avancée technologique. Par exemple, les manipulateurs sont la forme de robots la plus largement utilisée, et ils ont été intégrés dans diverses applications, telles que l'industrie automobile. Depuis, les gens ont progressivement pris conscience de l'urgence de disposer de robots mobiles, ce qui est évident pour atteindre cet objectif, les gens ont commencé un large éventail de domaines de recherche. [1]

Dans ce chapitre, on donnera un certain nombre de définitions ainsi qu'un bref historique sur la robotique. On cite les différents types de robots et leurs constituants. Enfin, on évoquera la classification des systèmes robotiques, tout en ouvrant une courte parenthèse sur les domaines d'applications possibles ainsi les avantages et les inconvénients des robots.

1.2. Définition générale

➤ Robot :

Est un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets ou la locomotion, dans le but de se substituer à l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles, cette réalisation est plus ou moins autonome selon les facultés de perception de l'environnement dont est doté le robot. [2]

➤ Robotique :

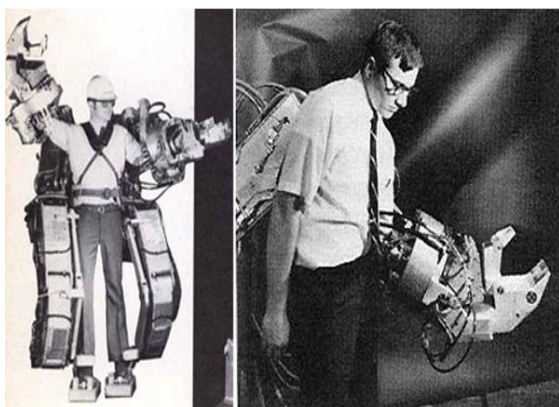
Est l'ensemble des activités de construction et de mise en œuvre des robots, on peut dire aussi que tout dispositif comporte une partie [opérationnelle] qui réalise la tâche et une partie [décisionnelle ou commande] qui contrôle la partie opérationnelle. [3]

1.3. Historique

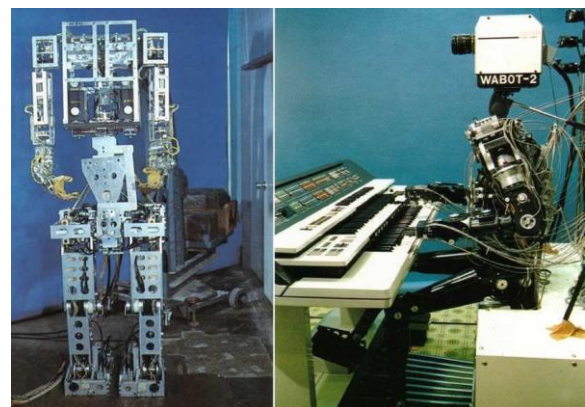
Le concept de robot date de plusieurs siècles, mais le terme robot fut inventé par le tchèque Karel Capek dans une pièce de théâtre écrite en 1920 : « RUR ou les robots universels de Rossum ». Ce terme est dérivé du verbe tchèque robota signifiant le travail forcé ou corvée.

Il est certain que depuis fort longtemps, les réalisateurs d'automates ont cherché à pouvoir insuffler à leur machine des comportements adaptés aux circonstances. Malheureusement jusqu'au vingtième siècle, les techniques étaient trop primitives pour permettre de telles réalisations. Il a fallu attendre les fins des années cinquante pour que Georges Devol invente une machine originale polyvalente et reprogrammable, ce qui a permis au robot d'acquérir une réalité industrielle. Ce robot appelé Unimate, était capable de manipuler des objets avec des actionneurs hydrauliques. Le fabricant de voiture américain General Motors sera le premier à installer ce bras articulé dans l'une de ses usines en 1961. L'Unimate a alors pour tâche de saisir des pièces de métaux chauds et de les empiler, une tâche particulièrement éprouvante pour les ouvriers. A cette époque, aucun ordinateur ne guide les mouvements de ce robot : ses instructions lui viennent d'un disque magnétique.

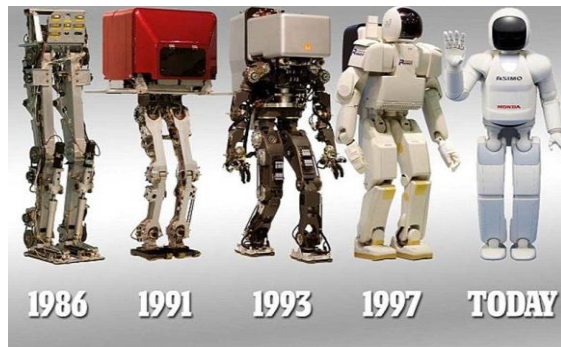
Après ce premier galop d'essai, ce ne fut que vers la fin des années 1970 que les robots industriels de première génération ont vu le jour. A partir de cette date, la course à la robotique industrielle va se mettre en place et chaque année de nouveaux secteurs industriels s'ouvrent à la robotisation au fur et à mesure que les équipements se diversifient, deviennent plus adaptés et surtout meilleur marché. Les robots sont devenus tellement indispensables dans certains secteurs industriels (l'automobile par exemple), que leur emploi conditionne la survie économique des entreprises. [4]



(a) modèle initial d'un exosquelette



(b) WABOT : le premier robot humanoïde



(c) l'évolution de ASIMO



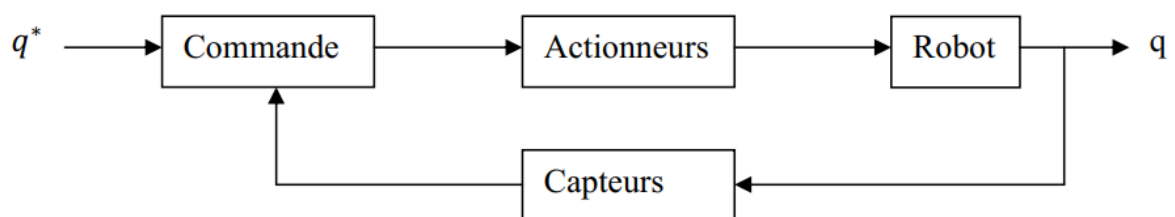
(d) Unimate: premier robot industriel

Figure I.1 : Historique des robots [5]

1.4. Composants d'un système robotique

Il y'a de quatre parties principales : [6]

- 1) Une structure mécanique qui sera le squelette du robot.
- 2) Le second élément correspond aux actionneurs (ex. servomoteurs) qui vont permettre au robot d'effectuer réellement ses actions. Ces actionneurs seront commandés par la partie commande en interaction avec les informations transmises par les capteurs.
- 3) La troisième composante d'un robot correspond aux différents capteurs sensoriels équipant le robot pour une application particulière.
- 4) Enfin le cerveau (partie commande) : C'est cette partie qui va permettre au robot d'analyser les données provenant des capteurs et d'envoyer les ordres relatifs aux servomoteurs. La partie commande est matérialisée physiquement par des cartes à base du microcontrôleur.

**Figure I.2:** Les composants de système robotique. [7]

I.4.1 Constituant d'un robot manipulateur



Figure I.3 : Vocabulaire du robot [8]

I.4.1.1. La Base

La base du manipulateur est fixée sur l'emplacement du travail, Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels

I.4.1.2. Segment (corps du robot)

Corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base, et les uns par rapport aux autres

I.4.1.3. Organe terminal

Désigne tout dispositif destiné soit à manipuler des objets comme les dispositifs de serrage, les dispositifs magnétiques ou à dépression, soit à transformer. Il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement.

I.4.1.4. Effecteur

L'effecteur final se connecte au bras du robot et fonctionne comme une main. Cette pièce entre en contact direct avec le matériau que le robot manipule. Certaines variantes d'un effecteur sont une pince, une pompe à vide, des aimants et des torches de soudage. Certains robots sont capables de changer les effecteurs finaux et peuvent être programmés pour différents ensembles de tâches

I.4.1.5. Articulation

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que :

$$0 \leq m \leq 6$$

Lorsque $m = 1$; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïdes, soit prismatique. [9]

1.5. Types des robots

Il existe deux types de robots : les robots mobiles et les robots manipulateurs

I.5.1. Robots mobiles

En général, on appelle robots mobiles l'ensemble des robots à base mobile. L'usage veut cependant que l'on montre le plus souvent par ce terme les robots mobiles à roues. Les autres robots mobiles sont en effet le plus souvent désignés par leur type de locomotion, qu'ils soient marcheurs, sous-marins ou aériens. [10]



Figure.I.4 : Robot mobile [11]

I.5.2. Robots manipulateurs

Les robots manipulateurs sont des robots intégrés dans un espace propre destiné au transfert de produits semi-finis entre les lignes de production. Le robot est généralement suspendu pour des questions d'encombrement et par contraintes d'implantation. [12]



Figure.I.5 : Bras Manipulateur [12]

I.6. Classification des robots

La classification des systèmes robotiques est difficile, car il existe de nombreux critères pour leurs descriptions. Cependant nous allons les classer selon deux structures qui sont les suivantes :

- Point de vue fonctionnel
- Point de vue géométrique [13]

I.6.1. Point de vue fonctionnel

Le nombre de classes et les distinctions entre celles-ci varient de pays à pays (6 classes au Japon, 4 en France). L'A.F.R.I. distingue 4 classes illustrées ci-dessous : [14]

I.6.1.1. Manipulateur à commande manuelle

Figure.I.6. Représente les manipulateurs à commande manuelle.



Figure I.6 : Manipulateur à commande manuelle [14]

I.6.1.2 Manipulateur automatique

Montre un bras manipulateur qui exerce des mouvements de soudure sans l'intervention de l'homme. [15]



Figure.I.7 : Manipulateur automatique [15]

I.6.1.3 Robots programmables

Ils répètent les mouvements qu'on leur a appris ou programmés, sans informations sur l'environnement ou la tâche effectuée. On peut aussi faire la distinction entre robots « play-back » qui reproduisent la tâche apprise et robots à commande numérique qui peuvent être programmés hors-ligne. [16]

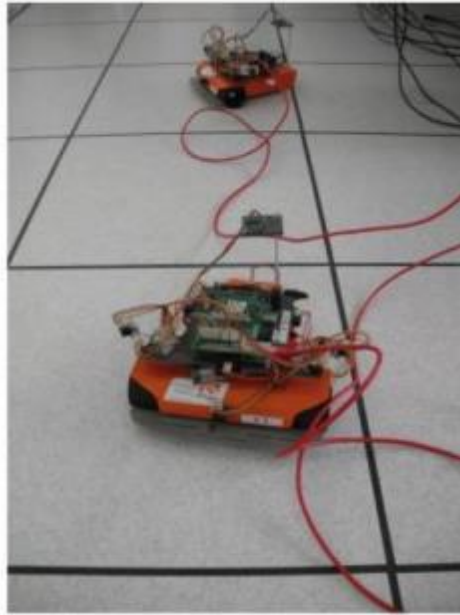


Figure.I.8 : Robot programmable [16]

I.6.1.4. Robots intelligents

On trouve actuellement des robots de seconde génération qui sont capables d'acquérir et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs d'efforts, ...). On étudie des robots de troisième génération, capables de comprendre un langage oral proche du langage naturel et de se débrouiller de façon autonome dans un environnement complexe, grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle [17]



Figure.I.9 : Robot intelligent [18]

I.6.2. Point de vue géométrique

On peut aussi classer les robots suivant leur configuration géométrique, autrement dit l'architecture de leur porteur [19]

I.6.2.1. Robots rectilignes

Les robots rectilignes ont trois axes de mouvement (x, y, z). Pour cette raison, le robot rectiligne est parfois appelé Robot cartésien. Ces robots sont exploités par vérin pneumatique

I.6.2.2. Robots cylindriques

Le robot cylindrique a deux axes de mouvement un axe est pour le mouvement en haut et en bas. L'autre axe est pour la rotation qui se fait par la jonction à la base. De plus, le bras horizontal peut se déplacer à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui donne un troisième axe de mouvement limitée.

I.6.2.3. Robots sphériques

Le robot sphérique est de grande taille avec un bras télescopique qui assure un mouvement à l'intérieur ou à l'extérieur. Les mouvements de base du robot sphérique sont de rotation (à la base) et angulairement en haut ou en bas (sur le bras).

I.6.2.4. Robots articulés

Le bras articulé du robot ressemble à un bras humain. Il se compose de deux éléments, nommés l'avant-bras et le bras supérieur. Ce type de robot n'a généralement pas besoin d'un lieu séparé.

[9]

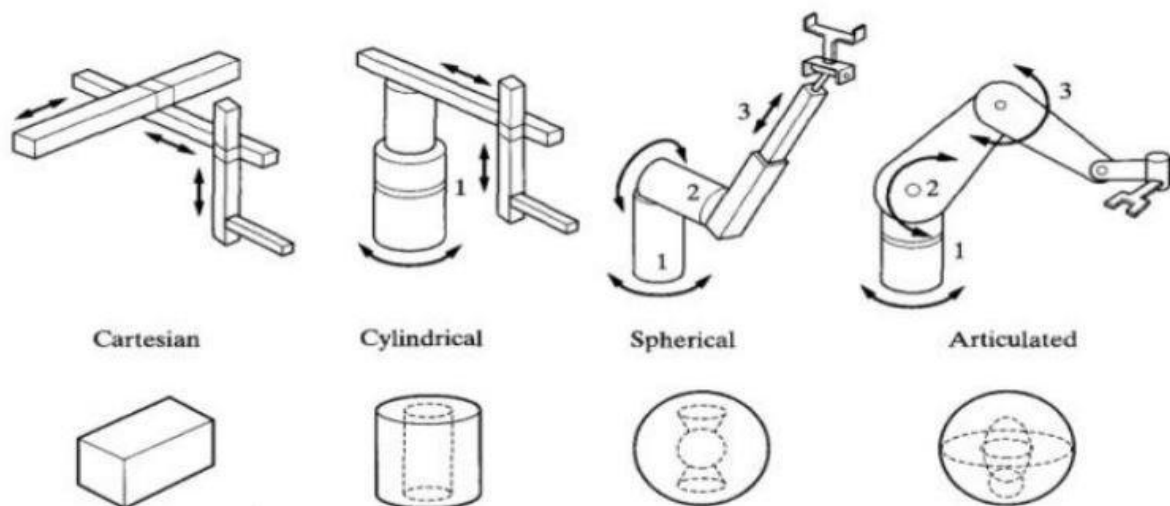


Figure 1.10 : l'espace de travail des robots [9]

I.7. Domaine d'application

Le but premier d'un robot est d'effectuer des tâches répétitives et/ou précises. Les robots permettent également d'effectuer des tâches dans des environnements de travail trop dangereux pour l'Homme. On peut les regrouper par Dull-Dirty-Dangerous. Les robots sont généralement

présents dans différents domaines d'application tels que l'industriel, médical, militaire et spatial. [19]

I.7.1. Domaine industriel

L'objectif de ces robots est de remplacer l'homme dans des activités fastidieuses ou onéreuses pour l'employeur. Les robots ont donc commencé à être utilisés dans les chaînes d'assemblage industrielles. Dans ces chaînes d'assemblage, on retrouve des robots soudeurs, manipulateurs, peintres... (Figure.I.5) [19]



Figure 1.11 : Bras soudeur d'ABB [19]

I.7.2. Domaine médical

Les robots commencent à être de plus en plus dans le domaine médical, qu'il s'agisse de « simples » échographies ou d'opérations chirurgicales plus délicates. En fait ces robots ne sont pas complètement autonomes mais ils assistent les médecins ou chirurgiens, jusqu'à permettre des opérations médicales à distance (télémédecine). On parle de chirurgie assistée c'est-à-dire tout ce qui consiste à introduire les derniers outils des technologies informatiques et robotiques dans la pratique médico-chirurgicale.

Cette pratique de « chirurgie assistée » est émergente donc bien que peu répandue, elle est en phase de devenir la du futur. (Figure.I.6) [19]



Figure 1.12 : Robot Da Vinci [19]

I.7.3. Domaine agricole

Après des décennies d'expérimentation et de tâtonnements, les robots ont enfin fait leur entrée à la ferme. Cette machine totalement autonome fonctionne grâce à l'énergie solaire et circule dans les rangées de plantations pour surveiller et analyser les plants voire (figure I.12)

Ce robot a déjà passé avec succès de nombreux tests réalisés dans des champs de légumes mais se contente de surveiller la « bonne santé » et plantations. Grâce à ces nombreux capteurs, senseurs et caméras, il détecte rapidement d'éventuelles anomalies (présence de mauvaises herbes, animaux nuisibles, croissance trop faible) et avertit l'exploitant agricole qui peut ainsi prendre immédiatement les mesures appropriées. [19]



Figure 1.13 : robot utilisé en agriculture [19]

I.7.4. Domaine militaire

Les robots sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire. En effet, la miniaturisation permet aujourd'hui de créer des robots discrets mais dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage, comme le montre la figure (1.13) suivante. De plus, certains robots sont équipés d'un armement pour évoluer en milieu hostile, dans le but de remplacer les soldats pour limiter les pertes humaines. [19]



Figure 1.14: Robot utilisé dans le domaine militaire [19]

I.7.5. Domaine spatial

Les robots spatiaux sont destinés à explorer des environnements où l'homme ne peut pas se rendre. C'est-à-dire des environnements souvent mortels pour l'homme.

Aujourd'hui, l'histoire de la conquête spatiale est devenue indissociable de celle de la robotique et à ce moment même plusieurs robots sont en activité, aussi bien sur la station spatiale internationale que sur la planète Mars. Les futures missions d'exploration feront elles aussi appel aux robots et à leur IA, que ce soit pour relever de nouveaux défis ou pour mieux connaître notre système solaire. Mais ces machines s'avèreront être de plus en plus variées puisque toutes les tailles, toutes les fonctions et tous les modes de déplacements sont à l'étude afin de développer des robots capables d'assurer des tâches très distinctes, de façon autonome ou en parfaite synergie avec les humains. [19]

I.7.6. Domaine des services

La révolution de la robotique a conduit ces dernières années à voir de nombreux robots s'installer chez les particuliers pour effectuer des tâches à la place de leur possesseur, **la figure I.14** illustre le robot de service ASIMO. En effet, ceux-ci sont capables de faire le ménage,

tondre la pelouse, nettoyer la piscine etc. Ce qui conduit certains clients (aisés) à se procurer ces domestiques contemporains. Enfin, la robotique autrefois réservée à

Des applications précises ou coûteuses, est aujourd'hui de plus en plus utilisée à titre ludique. En effet, les robots compagnons par exemple sont des objets de plus en plus convoités : les applications « basiques » de jouet pour enfant, jusqu'à l'humanoïde destiné à remplacer une présence humaine.

Enfin, la robotique autrefois réservée à des applications précises ou coûteuses, est aujourd'hui de plus en plus utilisée à titre ludique.

En effet, les robots compagnons par exemple sont des objets de plus en plus convoités : les applications « basiques » de jouet pour enfant, jusqu'à l'humanoïde destiné à remplacer une présence humaine. [19]



Figure 1.15 : Robot de service ASIMO[19]

I.8. Avantages et inconvénients des robots

Un système robotique consiste non seulement des robots mais aussi d'autres dispositifs et systèmes qui sont utilisés avec le robot pour effectuer la tâche nécessaire. Les avantages des robots sont [20]

- Robotique et automatisation peut dans de nombreuses situations d'accroître la productivité, la sécurité, l'efficacité, la qualité et la cohérence des produits.

- Les robots peuvent travailler dans un environnement dangereux, sans le besoin de soutien de la vie, ou les préoccupations concernant la sécurité.
- Robots n'ont pas besoin de l'éclairage, la climatisation, de ventilation et de protection contre le bruit.
- Robots travailler continuellement, sans ressentir une fatigue ou l'ennui, et ne nécessitent pas une assurance médicale ou de vacances.
- Les robots sont de précision répétable à tous les moments, sauf si quelque chose arrive à eux ou ils s'usent.
- Les robots peuvent être beaucoup plus précis que les humains. Précision linéaire d'un robot typiquement est de 20 à 10 microns.

L'inconvénient des robots est qu'ils manquent de capacité de réagir en cas d'urgence, à moins que les situations comprises et les réponses sont inclut dans le système. Les mesures de sécurité nécessaires pour s'assurer qu'ils ne lèsent pas les opérateurs et n'endommagent les machines qui travaillent avec eux. Inconvénients des robots comprennent :

Réponse inadéquate ou mal,

- Le manque de pouvoirs prendre une décision,
- Consommation de l'énergie
- Ils peuvent causer des dommages à des autres appareils, et la blessure de l'homme

Bien que les robots aient de bonnes certaines caractéristiques mais aussi ont ces caractéristiques limitées comme la capacité à degré de liberté, la dextérité, capteurs, système de vision et la réponse en temps réel. Les robots sont coûteux en raison du : coût initial de l'équipement, le coût d'installation, le besoin de périphériques, le besoin de formation et la nécessité de la programmation. [7]

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général générale sur les robots : (l'historique des robots, leurs constitutions, les différents types de robots, leurs classifications, les domaines d'application et leurs avantages et inconvénients).

Référence chapitre I

- [1] OULED SSSAID Manel et RECIOUI Hadjer, Conception et réalisation d'un robot suiveur de ligne, memoire de master, Université de Ghardaïa, 2021.
- [2] Généralités sur les robots manipulateurs - chelly nizar.
- [3] Généralités sur la robotique- introduction aux structures rigides et flexibles universite biskra.
- [4] S. Jlassi, Formulation et études des problèmes de commande en co-manipulation robotique, Paris Sud-Paris, 2013.
- [5] BOUSRIH Charaf-Eddine, "Conception d'un modèle d'exosquelette", Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur, HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES -T L E M C E N-, 2021.
- [6] N. TOUZOUTI, , Commande prédictive visuelle d'un bras manipulateur, Tizi-ouzou, Automatique, 2015.
- [7] BOUGHELLABA Abdelhak et CHEBBOUT Imade, Réalisation d'un bras manipulateur commandé par une carte Arduino, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2018.
- [8] R. N. ALFRED, MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN ROBOT MANIPULATEUR, UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO, 27/07/2023.
- [9] Djebarni Alaeddine et Hamdi Abderraouf, Etude et conception d'un bras de robot, memoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, 2021.
- [10] Hammadi Abdel kader et Beddou Hachem, Etude et contrôle d'un bras Manipulateur à base de carte Arduino piloter par interface graphique en labview , mémoire de Master, Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2022.
- [11] EL HAMZAOUI Oussama, « Localisation et Cartographie Simultanées pour un robot mobile équipé d'un laser à balayage : CoreSLAM », Thèse de Doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 2012.
- [12] BOSTELMAN Roger, « PERFORMANCE MEASUREMENT OF MOBILE MANIPULATORS », Thèse de Doctorat, UNIVERSITY OF BURGUNDY, 2018.
- [13] CRAIG, John J. , « Introduction to robotics: mechanics and control », Pearson Education International, Livre, 2009.
- [14] EL-HUSSIENY Haitham, « Robotics Engineering », Cours, Benha University, 2017.
- [15] GANGLOFF Jacques, « Cours de Robotique », Cours, ENSPS 3A Master ISTI, 2018.
- [16] ANGELES Jorge, « Fundamentals of robotic mechanical systems », Springer, Livre, 2002.
- [17] M. B., « Cours de Robotique », Cours, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, 2017.
- [18] FERRERO F., « Moteurs et transistors MOS », Cours, Université de Nice, 2017.
- [19] Younes Chebbah et Oussama, Simulation d'une cellule robotisée pour coopération de robots industriels par le logiciel d'ABB RobotStudio, memoire de master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2020.
- [20] H. TAKHI et R. C. ATTACHI, Conception et réalisation d'un robot mobile à base d'Arduino, Laghouat, ELECTRONIQUE, 2015.

Chapitre II :

L'exosquelette

dans le domaine médical

II.1. Introduction

Un exosquelette, passif ou motorisé, est une structure mécanique, articulée, appliquée à un sujet humain. Il n'est pas partie intégrante du sujet, mais intensifie les mouvements en utilisant une force mécanique. Il est, dans la plupart des cas, utilisé afin de compenser une fonction déficitaire : il peut être utilisé pour multiplier la force d'un individu, ou apporter plus de précision lors de la réalisation de certaines tâches dans le milieu industriel par exemple.

À partir de là, nous pouvons présenter 3 types d'exosquelettes, catégorisés selon les tâches auxquelles ils s'apparentent :

➤ **Les exosquelettes d'assistance :**

- Peuvent être utilisés dans le milieu militaire, sur un sujet sain, dans le but de préserver ce dernier, ou augmenter ses capacités physiques,
- Peuvent être utilisés dans un but de suppléance, afin d'aider un sujet en situation de handicap.

➤ **Les exosquelettes de rééducation :** dans le but de réaliser un réhabilité médical pour des sujets victimes de fractures ou d'autres maladies leur faisant perdre de manière réversible des fonctions motrices.

➤ **Les exosquelettes de télé opération :** dans le but de contrôler des machines à distance (dans le milieu industriel par exemple).

On en conclut que, comme pour tout dispositif de robotique, l'aspect d'un exosquelette est conditionné par la spécificité ou le type de tâche à laquelle il est associé. [1]

II.2. L'exosquelette dans le domaine médical :

II.2.1. La rééducation

La communauté scientifique a commencé à développer des exosquelettes ou des systèmes robotiques pour la rééducation à la marche et le renforcement musculaire [2]. L'un des premiers exosquelettes destinés à la rééducation a été développé par l'équipe de Rabischong en 1983 [3]. Il s'agissait de mettre en place deux exosquelettes travaillant en maître- esclave : une personne saine et valide enfle l'exosquelette maître et la personne à rééduquer, l'exosquelette esclave. La commande de l'exosquelette esclave permettait alors de reproduire les mouvements de l'exosquelette maître de manière précise. La difficulté

lorsqu'il s'agit de rééducation est la diversité de l'humain tant dans la morphologie que dans la pathologie.

L'un des exosquelettes de rééducation les plus connus est le Lokomat de Hocoma (Suisse) 2003 [4] (Figure II.1 (a)), Il s'agit d'un tapis de course permettant de rééduquer les personnes à la marche de manière intensive et dont la base est fixe (le poids du système et les batteries ne sont plus des problèmes). Le Lokomat présente un système de contre-poids afin de décharger partiellement le patient de son poids, en plus de sa structure fixe qui reprend les différents poids du système, ce qui permet d'avoir un contrôle des jambes plus efficace. On trouve l'exosquelette LOPES (Lower-extremity Powered ExoSkeleton) de l'université de Twente au Pays-Bas 2007 (Figure II.1 (b)), Pour améliorer la rééducation de la marche. Les auteurs cherchent à diminuer le nombre d'attaches de l'utilisateur et à s'adapter davantage aux mouvements de l'utilisateur que le Lokomat, notamment en augmentant le nombre de degrés de liberté. Au Japon, Sankai de l'Université de Tsukuba et son équipe mettent en place un exosquelette complet (bras plus jambes) pour la rééducation, le HAL (Hybrid Assistive Leg) de Cyberdyne 2002. Il a pour fonction d'augmenter les couples au niveau des articulations des hanches, des genoux et des chevilles [5]. L'intention de l'utilisateur est détectée via des capteurs EMG placés sur l'utilisateur lui-même [5], ce qui permet alors de déclencher l'assistance d'amplification d'effort. La nouvelle version de HAL présentée sur le site de Cyberdyne, assure bien le transfert de charge au sol contrairement aux anciennes versions (ce qui augmentait la charge sur les jambes de l'utilisateur). ReoAmbulator by Motorika 2007 (Figure II.1 (c)). On peut citer l'exosquelette Autonomyo (en cours de développement) de EPFL (Suisse) conçu pour assister les personnes atteintes de déficiences musculaires et motrices afin de les rendre plus autonomes [6], [7]. Il s'agit d'assistance à la marche pour des personnes myopathes ou âgées. Cet exosquelette est modulable pour s'adapter à toute morphologie et à toute difficulté musculaire. [8]

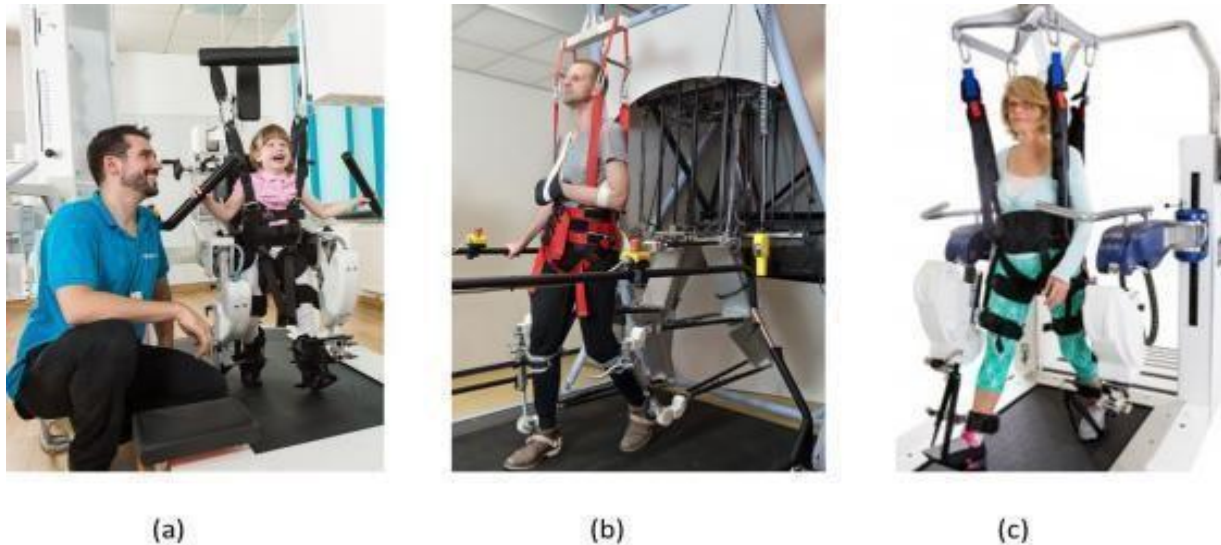


Figure II.1 (a) Lokomat (b) Lopes (c) ReoAmbulator [8]

II.2.2. Les exosquelettes pour personnes à mobilité réduite « d'assistance »

Ce sont les exosquelettes destinés aux personnes paraplégiques voire tétraplégiques. Sont des robots conçus pour porter l'utilisateur et pour faire des mouvements à sa place « mode robot »

a). Pour les enfants :

Récemment, certains exosquelettes d'enfants sont en cours de développement comme WAKE-UP par l'université de Tuscia [9], Anklebot pédiatrique [10] par le Massachusetts Institute of Technology, ATLAS 2020 [11] par Marsi Bionics, et Trexo exoskeleton par Trexo robotics comme le montre la figure (II.2. a, b, c, d) respectivement. L'ATLAS 2020 est principalement destiné aux enfants âgés de 3 à 14 ans seulement pour faire de la marche. Sa conception se compose de 5 degrés de liberté par jambe, deux à la hanche, un au genou et deux à la cheville [11]. Sa hauteur d'utilisateur doit être de 100 à 153 cm, et ses membres sont réglables à partir de 24 cm pour atteindre un maximum de 33 cm pour les deux cuisses, jarret. Le Trexo est conçu pour aider les enfants handicapés à marcher seulement. Sa conception se compose d'un marcheur ordinaire attaché deux pieds portables robotique. Il a deux degrés de liberté par jambe, les deux sont dans le plan sagittal sur la hanche et le genou fournissant la flexion et les mouvements d'extension. Les autres dispositifs tels que la Anklebot ou le WAKE-UP sont des dispositifs de thérapie et ne peuvent s'empêcher de faire toutes les activités de la vie quotidienne (p. ex., marcher, se tenir debout, etc.) puisqu'ils sont conçus pour des essais de marche de niveau sans soutien corporel [10], [12].

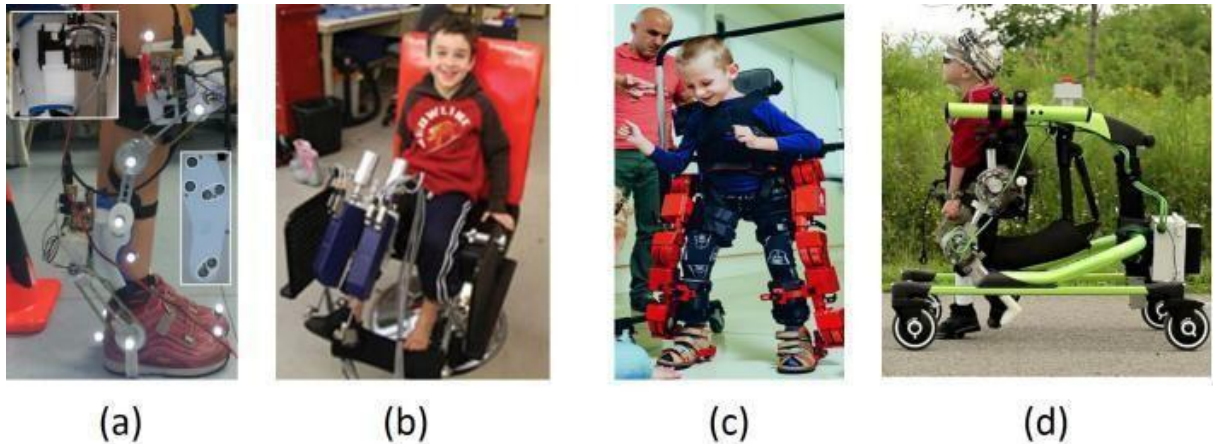


Figure II.2: exosquelettes Mobiles pour enfant ;
(a) WAKE-UP ; (b) Pediatric Anklebot ; (c) ATLAS 2020 ; (d) Tréxo [8]

b). Pour adulte :

Aujourd'hui, il existe différents modèles commercialisés tels que :

Le ReWalk™ [13] (figure II.3.a), le HAL® [14] (figure II.4.a), le Rex® [15] (figure II.4.b), le Indego® [16] (figure II.3.b), le Mina [17] (figure II.3.c), le Ekso™ [18] (figure II.4.c), le ARKE™ [19] (Figure II.5. (b)) le Keeogo™ [20] (Figure II.5. (a)), le Wandercraft [21] (Figure II.5. (a)), et d'autres modèles sont encore en phase de recherche.

On générale, le principe de leur fonctionnement est le suivant :

1. l'intention de l'utilisateur est détectée par :

- L'inclinaison du torse (liste non exhaustive) : ReWalk– EksoGT - Indego eLEGS, BERKELEY BIONICS (États - Unis) VariLeg , ETH ZURICH (Suisse) - TWIICE, EPFL (Suisse- en cours de développement) - lante , WANDERCRAFT (France en cours de développement)
- Une télécommande ou un joystick : REX

2. **Des schémas cycliques se marche prédéfinis dans le plan sagittal** études de biomécanique et de robotique bipède, sont alors générés. Ces cycles peuvent être des trajectoires à suivre ou des cycles de couples articulaires à jouer.

3. **Une commande en position ou en couple** va permettre à l'exosquelette de suivre ces cycles prédéfinis. Dans ce cas-ci, où un exosquelette est utilisé comme assistant technique, il est défini comme étant une structure externe couvrant les parties du corps humain et ayant des joints mécaniques correspondant aux articulations naturelles humaines [22]. C'est un appareil mécanique actif qui est essentiellement de nature anthropomorphique, qui est porté

de façon ajustée sur l'utilisateur et qui fonctionne en concert avec les mouvements de ce dernier. L'exosquelette fournit directement la puissance mécanique pour l'utilisateur afin d'amplifier la force musculaire humaine [8].

Ces dispositifs sont conçus pour les patients adultes qui peuvent se déplacer du haut du corps et non pas des membres inférieurs. L'Indego (Parker Hannin Company, États-Unis) [16], Rewalk [13], EKSO GT (Ekso Bionics, États-Unis) [18] sont des exosquelettes commerciaux destinés à usage personnel et rééducation, à l'exception de l'Ekso GT, qu'il est réservé à un usage clinique. Ce sont essentiellement des dispositifs de marche, mais ils peuvent effectuer des activités supplémentaires comme le sit-to-stand, stand-to-sit, des escaliers qui montent et descendent. Par exemple, Indego ne peut pas réaliser le mouvement assis-debout pour un patient complètement handicapé, mais il peut le faire pour quelqu'un qui l'utilise pour augmenter sa force musculaire. D'autre part, Rewalk peut effectuer toutes les activités prédéfinies pour tous les types de patients.

L'espace de travail de ces exosquelettes est inclus dans le plan sagittal (flexion/extension). Leur conception consiste en deux degrés actifs de liberté par jambe (hanche et genou) et un passif à la cheville. Leurs longueurs de membres peuvent être ajustées avec des pas discrets ainsi que leur largeur de hanche. Par exemple, le Rewalk n'a que 5 membres fixes de 29, 31, 33, 35 et 37 cm [10], et la largeur de la hanche Indego qui peut être portée jusqu'à un maximum de 42,2cm. Pour ces raisons, ils sont offerts en différents ensembles de tailles, comme les petites, moyennes et grandes, taille et poids des utilisateurs de 155-191 cm et 113 kg pour Indego, 160-190 cm et 100 kg pour Rewalk et 150-190 cm et 100 kg pour Ekso GT [23].

Autres exosquelettes en cours de développement dans les milieux universitaires tels que X1 Mina V2 (Florida Institute for Human and Machine Cognition), Varileg (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ, Suisse), Mars II (Project March, Université de Delft, Pays-Bas), et des entreprises Arke (Bionik Lab, Canada), ExoAtlet (ExoAtlet, Russie), ROKI (ROKI Robotics, Mexique), TWIICE (Laboratory of Robotics Systems LSRO, Suisse), H- Mex (Hyundai, Corée du Sud) et Pheonix (SuitX, États-Unis). Bien que TWIICE avait une version plus ancienne qui avait fixé étapes longueurs réglables à t patients de 135-158cm. Mais dans la dernière version, il a été fait pour le bien de la concurrence Cybathlon qui est seulement la hauteur du concurrent de 158cm. Le H-Mex est un appareil fonctionnel qui peut supporter jusqu'à 40 kg du poids du patient. Pheonix est un exosquelette de la hanche et ne peut donc pas effectuer d'activités quotidiennes. [8]



(a)



(b)



(c)

Figure II.3 (a) Le ReWalk™ [13], (b) le Indego® [16] et (c) le Mina [17]



(a)



(b)



(c)

Figure II.4 (a) Le HAL® [8], (b) le Rex® [2] et (c) le Ekso™ [5].



Figure II.5 (a) Le Keeego™ [20], (b) le ARKE™ [19] et (c) le Wandercraft [21].



Figure II.6 exosquelettes Adultes :

(a) PheoniX (b) TWICE (c) Indego (d) Rewalk (e) EKSO GT (f) MINA
 (g) ARKE (h) ITRI (i) REX (j) ATALANTE (k) VariLeg (l) HANK (m)
 Fourier X (n) MARCH II (o) ExoAtlet (p) HAL [8]

II.3. Capteurs de mouvement et de force utilisés en exosquelettes

II.3.1. Capteur Potentiométrique :

Un capteur Potentiométrique est constitué d'une résistance fixe (R_h). Sur cette résistance, se déplace un curseur (c) qui relié mécaniquement à une pièce en mouvement (déplacement à mesurer). La tension mesurée (U_s) entre le curseur et une extrémité de la résistance est proportionnelle au déplacement mécanique. [24]

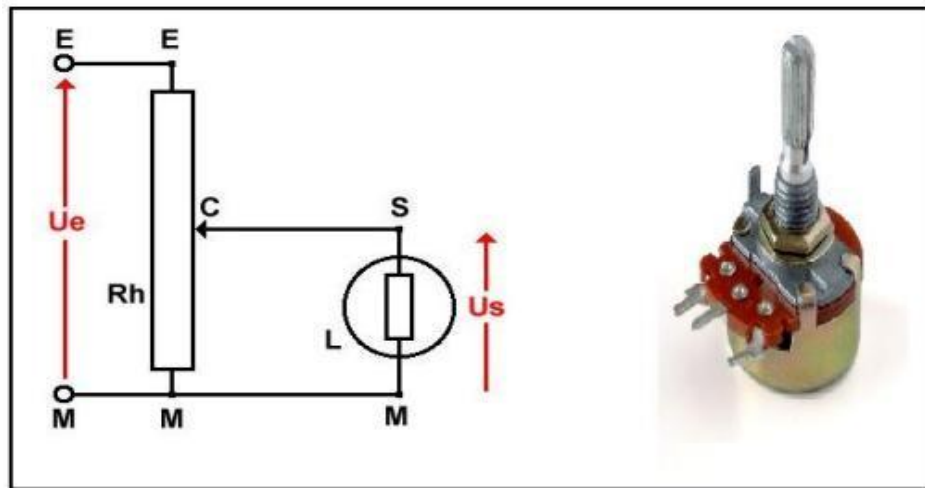


Figure II. 7 : Symbole électrique et Image d'un potentiomètre [24].

II.3.2. Électromyogramme (EMG)

Un électromyogramme (EMG) est un examen qui permet d'enregistrer l'activité électrique des nerfs et des muscles, et donc d'évaluer leur fonctionnement. Il consiste à appliquer un faible courant électrique au niveau des fibres nerveuses, sensibles ou motrices, du système nerveux périphérique. Un exosquelette utilisant les EMGs permet donc à son utilisateur de contrôler ses mouvements à l'aide des signaux nerveux qu'il émit. [25]

II.3.3. Centrales inertielle (IMU : Inertial Measurement Unit)

Une centrale inertielle (IMU) est un système complet, composé au minimum de 3 accéléromètres et de 3 gyroscopes permettant de mesurer les composantes selon les 3 axes de l'accélération non gravitationnelle et de la vitesse instantanée de rotation du véhicule par rapport à un référentiel inertiel (qui est confondu avec le repère terrestre dans la plupart des cas). Les centrales inertielle sont des systèmes complexes et chers. Elles intègrent une électronique permettant de corriger les données capteurs : compensation de l'accélération au niveau de la mesure des gyroscopes, auto-compensations en température,

orthogonalisation des axes de mesures, etc. On distingue deux types principaux de centrales inertielles : les centrales strap-down et les centrales à plate-forme stabilisées [26].

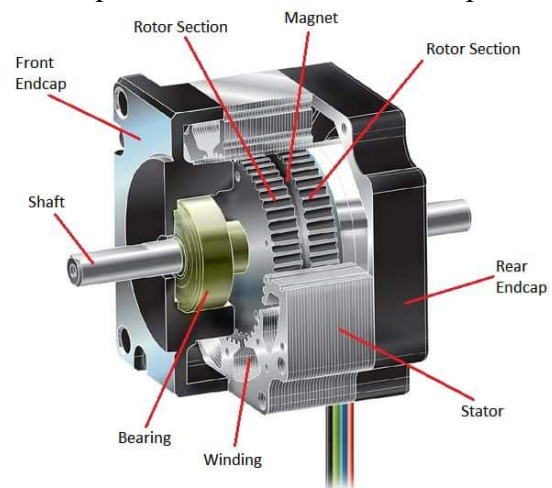
II.4. Actionneurs adaptés

II.4.1 Moteur pas à pas :

Un moteur pas à pas est un dispositif électromécanique convertissant l'énergie électrique en puissance mécanique. Il est un moteur synchrone sans balais qui peut diviser une rotation complète en un grand nombre d'étapes.

Lorsqu'un moteur pas à pas est appliqué avec des impulsions de commande électriques dans la séquence appropriée, l'arbre ou la broche du moteur pas à pas tourne par étapes discrètes, permettant un contrôle précis de la position du moteur sans aucun mécanisme de rétroaction, tant que le moteur est dimensionné pour l'application. Sa structure de base se présente sous la forme de deux pièces séparées mécaniquement, le Stator et le Rotor par une liaison pivot.

Le stator, partie fixe par rapport au bâti, qui permet l'échange de l'énergie électrique, grâce à des fils conducteurs reliés au circuit électrique. Le rotor, partie mobile par rapport au bâti, qui permet l'échange de l'énergie mécanique, grâce à un arbre accouplé au système mécanique.



Le transfert interne entre énergie électrique et énergie mécanique se fait par l'intermédiaire de l'énergie magnétique, grâce à une interaction entre le champ magnétique inducteur produit par le stator et celui induit dans le rotor.

II.4.2 Servomoteurs :

Les servomoteurs sont un système électrique qui peut atteindre des positions prédéterminées et les maintenir. La position est : dans le cas d'un moteur rotatif, la valeur de l'angle, dans le cas d'un moteur linéaire, la distance. Utiliser des moteurs électriques (continus, asynchrones, à bagues) et des moteurs hydrauliques. Le démarrage et le maintien de la position prédéterminée sont commandés par le système de régulation. Un servomoteur est un ensemble complet de mécanique et d'électronique, qui contient : [27]

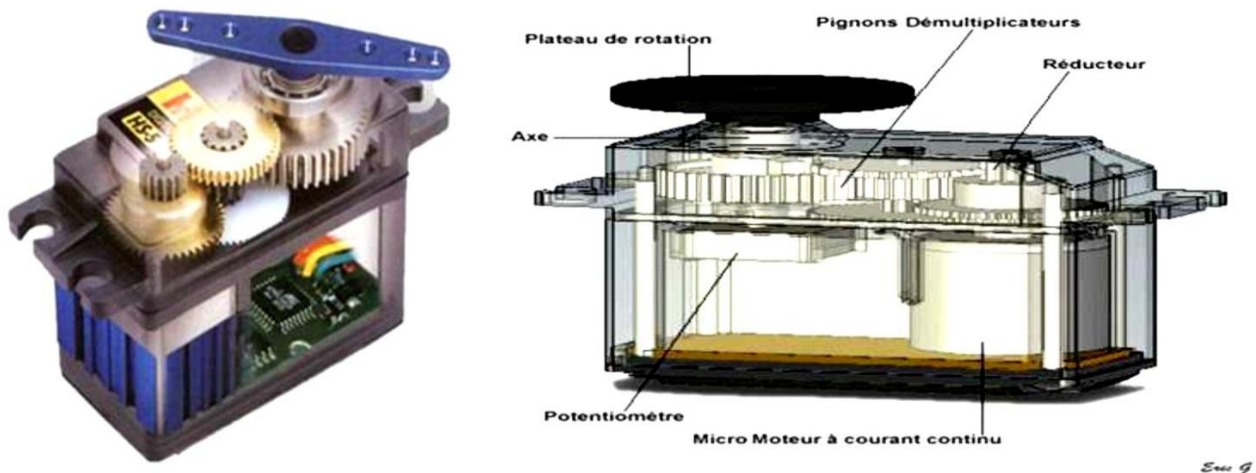


Figure II.8 : Schémas des éléments d'un servomoteur. [28]

➤ Les fils, qui sont au nombre de trois (comme la **Figure II.9.** Montre)

- Rouge : pour l'alimentation positive (4.5V à 6V en général)
- Noir ou marron : pour la masse (0V)
- Orange, jaune, blanc, G : entrée du signal de commande.

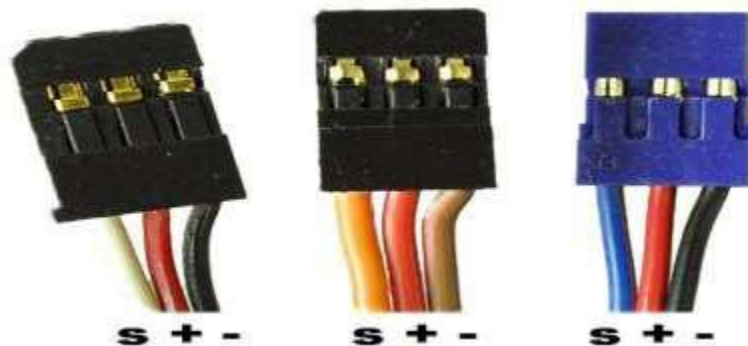


Figure II.9: Certains types du fils de servomoteur. [28]

- L'axe de rotation sur lequel est monte un accessoire en plastique ou en métal
- Le boîtier qui le protège.
- Un moteur à courant continu.
- Des engrenages pour former un réducteur (en plastique ou en métal).
- Un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (un potentiomètre bien souvent)

- Une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu.

❖ Le servomoteur est contrôlé par un câble à trois conducteurs, qui sert à alimenter le moteur et à lui envoyer des commandes de position sous forme de signaux codés en largeur d'impulsion, généralement appelés PWM (modulation de largeur d'impulsion, modulation de largeur d'impulsion). Cela signifie que la durée de l'impulsion détermine l'angle absolu de l'arbre de sortie et la position du bras de commande de l'actionneur. Ce signal se répète périodiquement, généralement toutes les 20 millisecondes, ce qui permet au dispositif électronique de contrôler et de corriger en permanence la position angulaire de l'arbre de sortie, qui est mesurée par un potentiomètre. Lorsque le moteur tourne, la position de l'arbre du servomoteur change, modifiant ainsi la résistance du potentiomètre. La fonction du composant électronique est de contrôler le moteur pour que la position de l'arbre de sortie soit cohérente avec la commande reçue, qui est une sorte d'asservissement. [27]

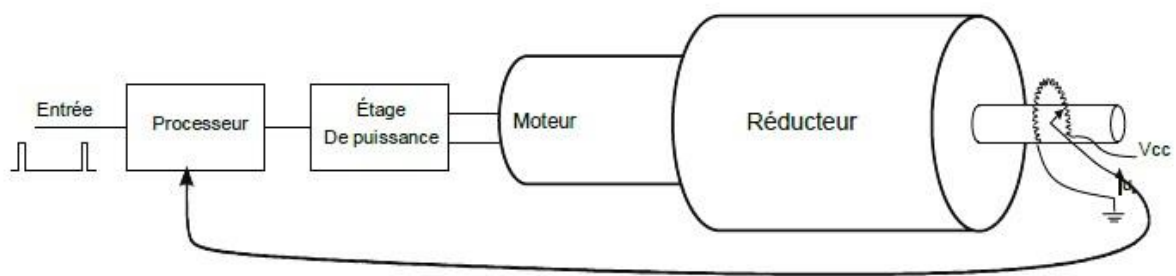


Figure II.10: Principe d'un servomoteur [28]

❖ Le signal de commande est donné sous forme d'impulsions de largeur variable, correspondant à l'angle de rotation souhaité. Afin de maintenir une position donnée, le signal doit être périodique avec une fréquence comprise entre 50 et 100 Hz. L'angle de rotation maximum peut varier d'un modèle à l'autre, mais il est généralement compris entre $[0^\circ, 180^\circ]$. [28]

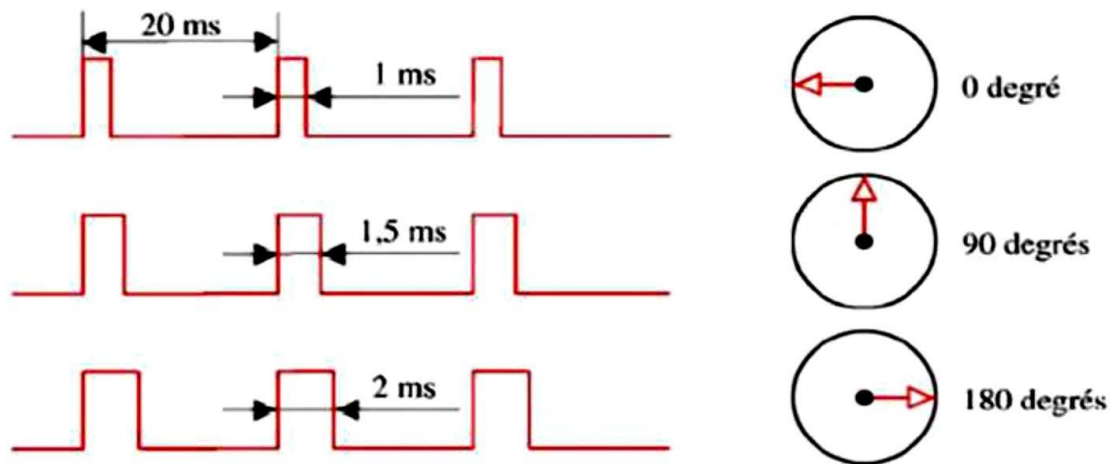


Figure II.11 : donne des exemples de signaux pour 3 positions de l'axe de rotation. [28]

II.4.3 Microcontrôleur :

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui rassemble les éléments essentiels d'un ordinateur. Il s'agit d'un composant électronique, qui s'intègre dans un circuit électronique.

- **La mémoire morte** : (ROM = Read Only Memory) qui contient les instructions. Son contenu est permanent, et reste intact lorsque le système n'est plus alimenté, contient généralement d'un à quelques centaines de kilooctets.
- **Le processeur** : il interprète les instructions et traite les données d'un programme. Est cadencé à des fréquences de quelques mégahertz ou dizaines de mégahertz. Il ne consomme généralement qu'une fraction de watt. Son jeu d'instructions est plus simple
- **La mémoire vive** : (mémoire vive RAM) de la mémoire pour stocker les variables durant l'exécution du programme. Est généralement très limitée : de quelques centaines d'octets (ou en anglais byte, abrégé "B") à quelques dizaines de kilooctets selon les modèles.
- **Les circuits d'entrée-sortie** sont simplement des entrées logiques, pour lire une valeur binaire, comme par exemple un interrupteur, ainsi que des sorties logiques, capables de fournir quelques milliampères, par exemple pour commander une LED.

L'intérêt des microcontrôleurs réside dans leur :

- Plus haut degré d'intégration,
- Plus faible consommation électrique.

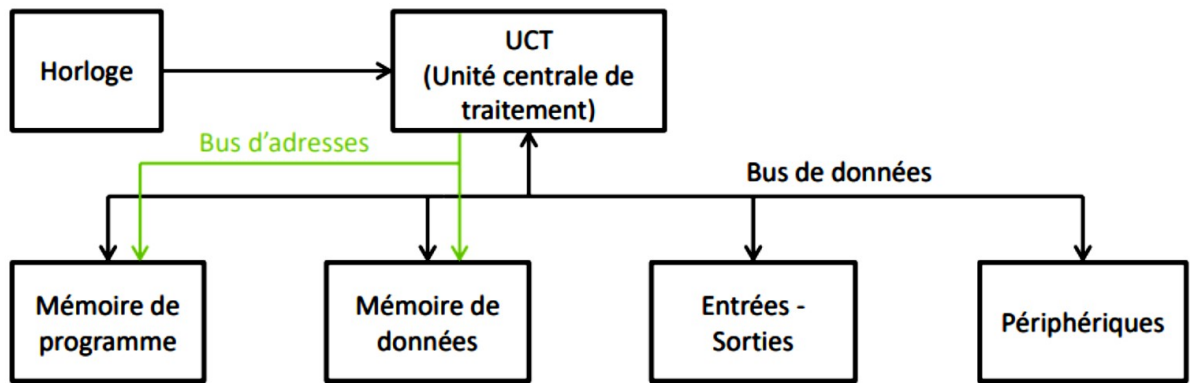


Figure II.12 : Architecture simplifiée d'un microcontrôleur [29]

Bien que les microcontrôleurs existent depuis les années 1970, ils se sont rapidement développés ces dernières années. Les microcontrôleurs actuels comprennent La mémoire flash facilite l'écriture des programmes à exécuter. Au niveau du marché, les fabricants (Microchip-Atmel, Texas Instrument, NXP) fournissent de nombreux microcontrôleurs. Chaque fabricant fournit généralement plusieurs séries de microcontrôleurs, et chaque série comprend généralement des dizaines. [29]

II.5 Conclusion :

Dans ce présent chapitre, nous avons présenté des généralités sur les différents types d'exosquelette et leur utilisation dans le domaine médical, les technologies capteurs et actionneurs qui constituent généralement l'exosquelettes.

Référence - Chapitre II :

- [1] YADI Khalil et KHELIL Ghizlène, *Conception et réalisation d'un exosquelette pour la réhabilitation médicale, mémoire de master, HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES*, 2023.
- [2] D. P. Ferris, G. S. Sawicki, et A. Domingo, « *Powered lower limb orthoses for gait rehabilitation* », *Top. Spinal Cord Inj. Rehabil.*, vol. 11, no 2, p. 34-49, doi: 10.1310/6gl4-um7x-519h-9jyd., 2005.
- [3] Vaiyee HUYNH, *Stabilité Posturale d'un Exosquelette Actif de Jambes, thèse de doctorat, université britagne loire centrale nante*, 2017.
- [4] R. Riener, L. Lünenburger, I. C. Maier, G. Colombo, et V. Dietz, , « *Locomotor Training in Subjects with Sensori-Motor Deficits: An Overview of the Robotic Gait Orthosis Lokomat* », *J. Healthc. Eng.*, vol. 1, no 2, p. 197-216, doi: 10.1260/20402295.1.2.197, 2010.
- [5] H. Kawamoto et Y. Sankai, « *Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person* ». doi: 10.1007/3-540-45491-8_43., 2002.
- [6] A. Ortlieb, J. Olivier, M. Bouri, H. Bleuler, et T. Kuntzer, « *From gait measurements to design of assistive orthoses for people with neuromuscular diseases* », in *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, p. 368-373,doi: 10.1109/ICORR.2015.7281227., 2015.
- [7] A. Ortlieb, M. Bouri, et H. Bleuler, Éd, « *AUTONOMYO: Design Challenges of Lower Limb Assistive Device for Elderly People, Multiple Sclerosis and Neuromuscular Diseases* », *Wearable Robot. Chall. Trends*, doi: 10.1007/978-3-319-46532-6_72., 2017.
- [8] MEDJADJI Malek, *L'exosquelette des membres inférieurs pour les personnes paraplégiques, mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen*, 2022.
- [9] F. Patane, S. Rossi, F. Del Sette, J. Taborri, et P. Cappa, « *WAKE-Up Exoskeleton to Assist Children With Cerebral Palsy: Design and Preliminary Evaluation in Level Walking* », *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. Publ. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 25no 7, p. 906-916, doi: 10.1109/TNSRE.2017.2651, 2017.
- [10] H. I. Krebs et al., , « *Pediatric anklebot* », in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, p. 5975410. doi: 10.1109/ICORR.2011.5975410, 2011.
- [11] J. S. D. S.-M. e. M. P. E. Garcia, « *Atlas 2020: the pediatric gait exoskeleton project* », in *Human-Centric Robotics*, *WORLD SCIENTIFIC*, p. 29-38. doi: 10.1142/9789813231047_0007., 2017.
- [12] K. P. Michmizos, S. Rossi, E. Castelli, P. Cappa, et H. I. Krebs, « *Robot-Aided Neurorehabilitation: A Pediatric Robot for Ankle Rehabilitation* », *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. Publ. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 23, no 6, p. 1056-1067, doi :.1109/TNSRE.2015.2410773., 2015.
- [13] « *ReWalk Robotics - More Than Walking* », , *ReWalk – More Than Walking*. <https://rewalk.com/> (consulté le 19 avril 2025)..

- [14] « CYBERDYNE », <https://cyberdyne.jp/english/index.html> (consulté le 19 avril 2025)..
- [15] « Rex Bionics - Reimagining Rehabilitation », *Rex Bionics*. <https://www.rexbionics.com/> (consulté le 19 avril 2025)..
- [16] « Indego | Powering People Forward ». , <http://www.indego.com/indego/us/en/home> (consulté le 19 avril 2025)..
- [17] P. D. Neuhaus, J. H. Noorden, T. J. Craig, T. Torres, J. Kirschbaum, et J. E. Pratt , « *Design and evaluation of Mina: a robotic orthosis for paraplegics* », *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot. Proc.*, vol. 2011, p. 5975468, doi: 10.1109/ICORR.2011.5975468, 2011.
- [18] « Investor Relations », *Ekso Bionics Holdings, Inc.* <https://ir.eksobionics.com> (consulté le 19 avril 2025)..
- [19] B. Inc, « Overview :: Bionik Laboratories Corp. (BNKL) ». <https://www.bioniklabs.com/about/overview..>
- [20] « Keeogo - B-Temia », <https://b-temia.com/keeogo/> (consulté le 19 avril 2025)..
- [21] « Accueil - Wandercraft », <https://www.wandercraft.eu/fr/accueil-2/>.
- [22] P. Sale, M. Franceschini, A. Waldner, et S. Hesse, « *Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury* », *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.*, vol. 48, no 1, p. 111-121, 2012.
- [23] H. Cao, Z. Ling, J. Zhu, Y. Wang, et W. Wang, « *Design frame of a leg exoskeleton for load- carrying augmentation* », *2009 IEEE Int. Conf. Robot. Biomim. ROBIO*, doi: 10.1109/ROBIO.2009.5420684., 2009.
- [24] AZEDOUZ ABDESSAMAD & TAGMAOUI ABDELILLAH, *Simulation et réalisation d'un détecteur de fumée, mémoire de master, Université Aboubakr BelkaïdTlemcen*, 2020.
- [25] BOUSRIH Charaf-Eddine, "Conception d'un modèle d'exosquelette", *Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur,HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES -T L E M C E N-*, 2021.
- [26] Oliver J. Woodman, «*An introduction to inertial navigation.* », *Cambridge CB3 0FD United Kingdom*, 2007.
- [27] MANSOURI Rafik, KHELID Ali, *Conception et réalisation d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté commandé par la carte Arduino UNO. TIZI-OUZOU : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI*, 2015.
- [28] RAHAL Fouad et ABDELLATIF Abdelmoniaame, *Conception et réalisation d'un bras de robot piloté, memoire de master, UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA*, 2021.
- [29] BENZAID Haroun et MEDJDOUB Seyf Elislam, *Conception et modélisation d'un bras manipulateur, mémoire de master, Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf-Mila*, 2021.

Chapitre III :
Simulation et Conception
d'un bras robotique type
exosquelette

III.1. Introduction

Les dispositifs disponibles sur le marché sont souvent coûteux et complexes. C'est pourquoi nous avons conçu un modèle de **bras robotique de type exosquelette** à faible coût, pouvant être fixé directement sur le bras du patient, afin de l'assister dans les mouvements de flexion et d'extension du coude, contribuant ainsi à lui redonner un certain degré d'autonomie dans le cadre d'une rééducation fonctionnelle.

Ce système repose sur des composants électroniques simples et accessibles (comme une carte Arduino et un servomoteur), avec deux modes de commande :

- ❖ Un contrôle manuel : un contrôle analogique par potentiomètre ou des boutons poussoirs pour ajuster précisément l'angle du bras.
- ❖ Un contrôle Automatique : dont la lecture est séquentielle des positions enregistrées précédemment par l'utilisateur.

III.2 Principe de conception :

Le système se compose d'une structure de soutien fixée sur le bras humain, divisée en deux parties principales :

- **Une partie supérieure** : attachée au bras (humérus) à l'aide de sangles ou de supports flexibles.
- **Une partie inférieure** : fixée sur l'avant-bras (avant-bras), reliée à la partie supérieure au niveau de l'articulation du coude par un axe de rotation du servomoteur.

Un servomoteur est placé au niveau de l'articulation du coude pour assurer le mouvement de l'avant-bras vers le haut ou vers le bas, sous le contrôle de l'utilisateur. Cette conception offre **un seul degré de liberté (1 DoF)** correspondant au mouvement de **flexion/extension** du coude, qui est la cible principale dans le cadre de la rééducation fonctionnelle.

Le mouvement est contrôlé par deux manières :

- **À l'aide de deux boutons** : le bouton A pour lever le bras, le bouton B pour l'abaisser....

- **À l'aide du mouvement de poignet** : grâce à un potentiomètre permettant la détection du sens du mouvement du poignet, et l'ajustement progressif et précis de l'angle de mouvement vers le haut ou vers le bas ou vice versa

L'amplitude du mouvement est limitée entre 0° et 90° pour garantir la sécurité du patient, avec un pas de mouvement adaptable environ 5 degrés afin d'assurer une transition fluide et confortable pendant l'utilisation.

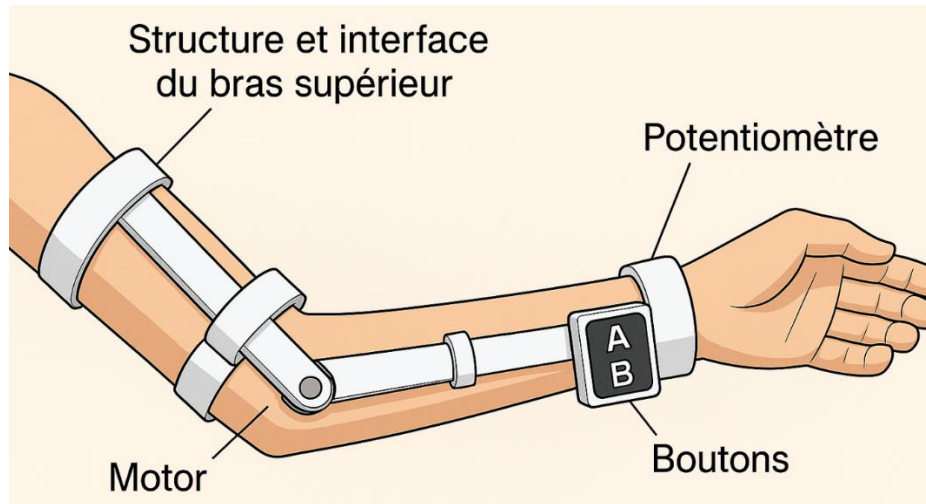


Figure III.1 : structure et interface du bras avec des composants.

III.3 Sélection des composants

III.3.1 La carte Arduino :

La carte Arduino est un microcontrôleur open source, qui a été adopté par la communauté des concepteurs. Il s'agit d'un système numérique à processeur entouré d'une mémoire et des interfaces avec le monde extérieur. Ces microcontrôleurs ont des performances réduites, mais sont de faible taille et consomment peu d'énergie, les rendant indispensables dans toute solution d'électronique embarquée (robots, bras mobile,...). La carte Arduino n'est pas le microcontrôleur le plus puissant, mais son architecture a été publiée en open-source. [1]

III.3.1.1 La carte Arduino UNO :

– **Partie matérielle** : La carte à microcontrôleur Arduino UNO est la première version stable de carte Arduino. Elle utilise un microcontrôleur AVR d'architecture ATmega328p cadencé à 16Mhz. Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2kcode SRAM (mémoire vive) et 1 ko d'EEPROM (mémoire morte destinée aux données). Elle contient 14 broches d'entrée/sortie numériques dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM

(Modulation à largeur d'impulsions) et elle permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques La figure III.2 illustre une carte Arduino UNO [1]. [2]

Note ; La carte UNO peut-être alimentée soit via le port USB ou à l'aide d'une alimentation externe qui consiste à brancher une batterie au connecteur qui s'appelle (prise jack).

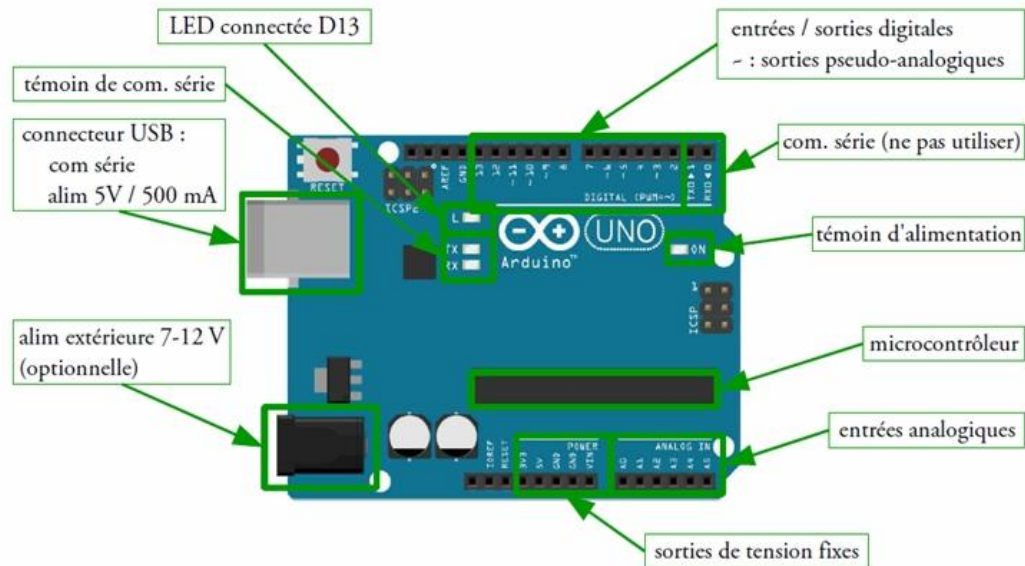


Figure III.2 : Carte Arduino UNO

Partie logicielle : Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information ce programme appelé IDE Arduino. Comme n'importe quel langage de programmation, une interface souple et simple est exécutable sur n'importe quel système d'exploitation Arduino basé sur la programmation en C. [3]

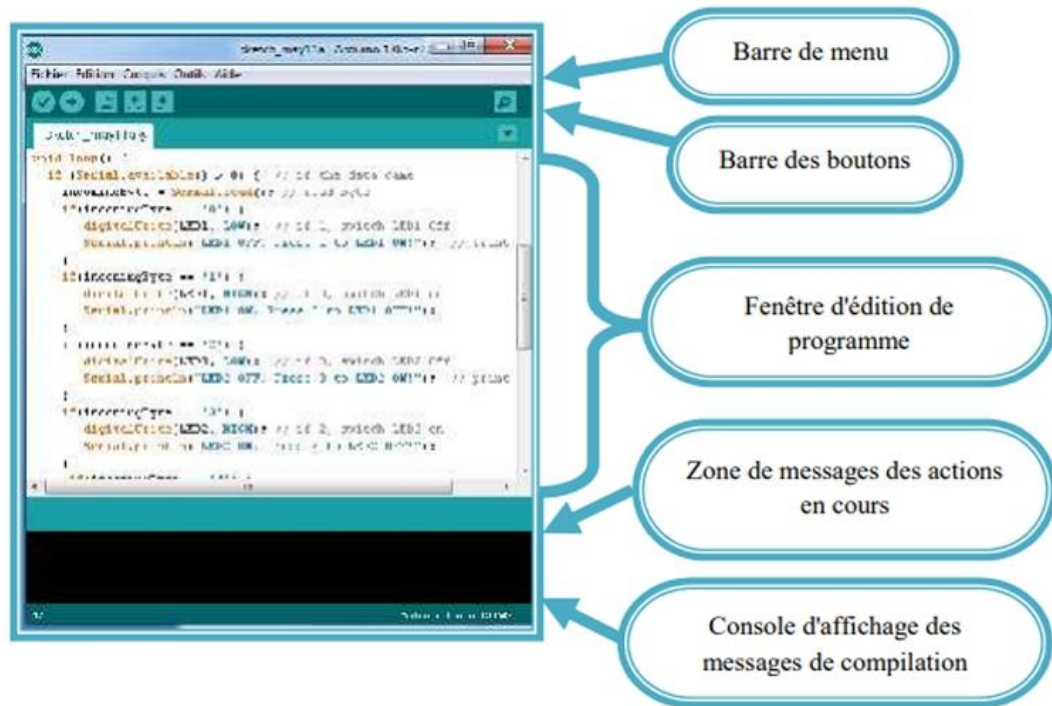


Figure III.3 : Interface Logiciel Arduino IDE.

III.3.2 Servomoteur : Un servomoteur est un moteur électrique spécifique pour un déplacement angulaire, le pilotage des servomoteurs avec Arduino permet de se positionner précisément sur un angle dédié. La plage de l'angle est généralement de 0 à 180 degrés. Il en existe de différentes tailles (question de couple ou de force) mais ils fonctionnent tous de la même manière.

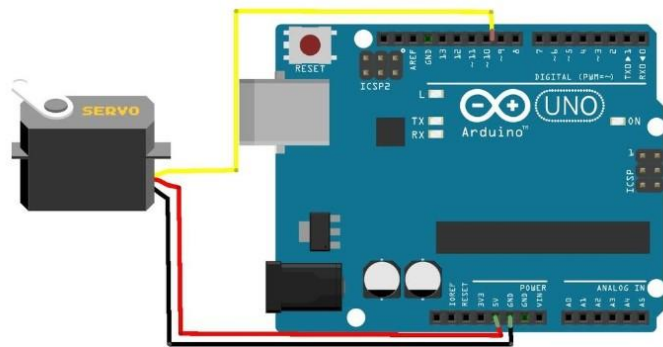


Figure III.4 : Servomoteur avec Arduino.

III.3.3 Le potentiomètre : est une résistance variable avec un axe soit rotatifs, soit linéaires, et comme toute résistance, les potentiomètres modifient la tension d'un circuit (principe de diviseur de tension), ils ont en général trois broches, les broches extérieures se connectent sur l'alimentation +5 V et sur la masse, alors que la broche centrale envoie le signal sur la broche d'entrée analogique (A0 à A5) de l'Arduino principalement utilisés comme entrée (*input*)

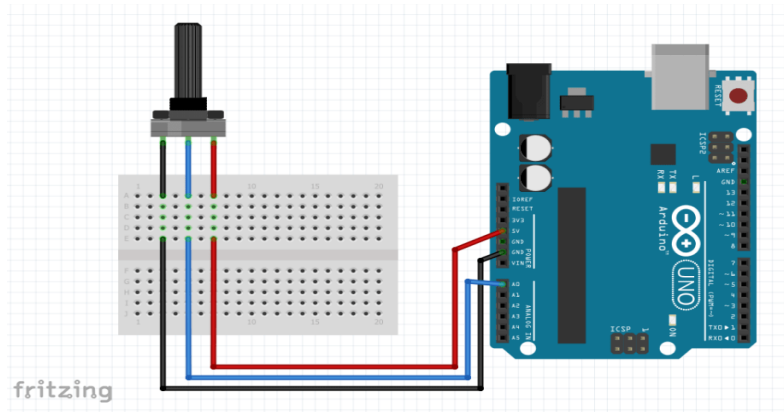


Figure. III.5 : Un potentiomètre avec Arduino.

III.3.4 Plaque d'essai ou breadboard/protoboard :

Une plaque d'essai, aussi connue comme breadboard ou protoboard, est un tableau composé d'orifices électriquement connectés entre eux de façon interne. Sur cette plaque on peut insérer les éléments électroniques et les fils pour le montage et prototypage de circuits électroniques

III.3.5 Un bouton poussoir :

Un bouton poussoir est un composant électronique qui permet de contrôler l'ouverture ou la fermeture de l'état d'un circuit électronique, il est souvent utilisé pour des fonctions temporaires ou pour une action ponctuelle.

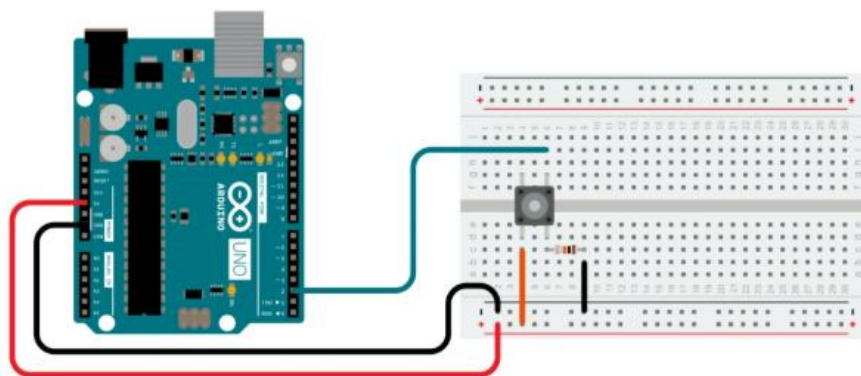


Figure III.6: Branchement de bouton poussoir à Arduino [4]

III.4 Réalisation électronique (simulation dans Proteus) :

III.4.1 Présentation du logiciel ISIS :

Proteus est une suite logicielle destinée à l'électronique. Développé par la société « Lab center Electronics », les logiciels incluent dans Proteus permettent la conception assistée par ordinateur dans le domaine électronique. Deux logiciels principaux composent cette suite logicielle : ISIS, ARES [40]. Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connue pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits. [5]

Isis Proteus est un logiciel de développement et de simulation largement utilisé ces dernières années comme outil pédagogique, en particulier pour sa simplicité et due à son environnement graphique et interactif. Les différents outils mis à la disposition de l'utilisateur permettent, outre la simulation, des analyses dans des domaines différents (temporel, fréquentiel), ainsi que des régimes différents (statique, dynamique).

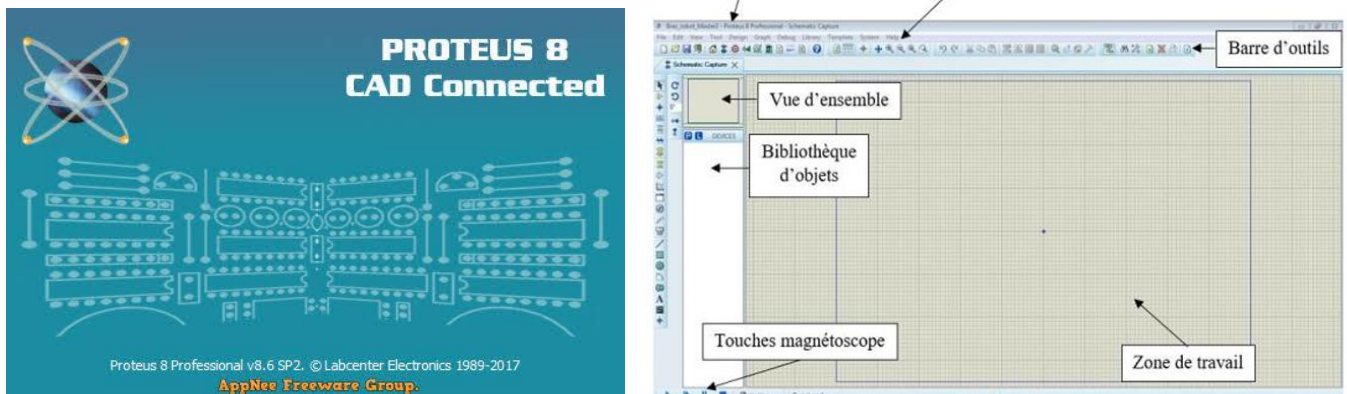


Figure.III.7. : Proteus, Écran du chargement et interface graphique

III.4.2 Schéma de notre circuit de commande sur Proteus :

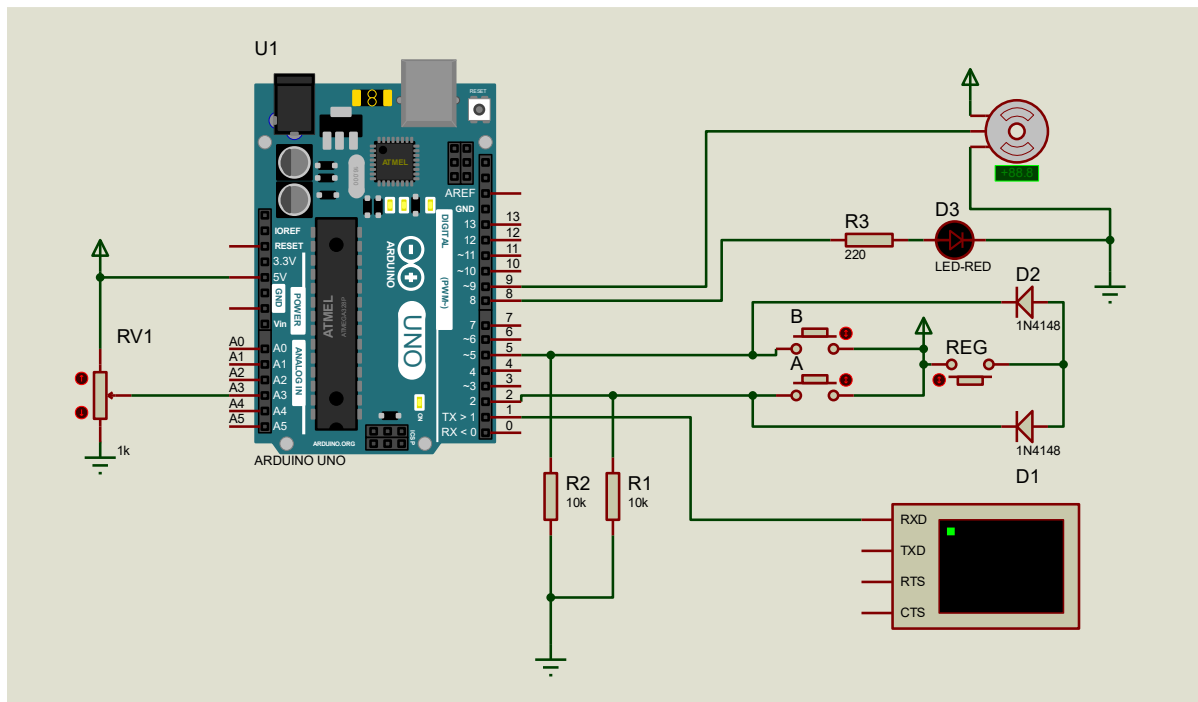


Figure.III.8. : schéma électronique du circuit de commande du bras robotique

III.4.3 Connexion des composants :

Composants	Reference Arduino	Type de connexion	Fonction ou remarque
Servo-moteur	D9	Sortie PWM	Mouvement du bras (exosquelette)
Potentiomètre (contrôle)	A3	Entrée analogique	Détecter les mouvements du poignet du patient et Permet le contrôle manuel de l'angle
Bouton A	D2	Entrée numérique (digital)	Appui court : déplacement 5° en haut Appui long : Démarre la lecture séquentielle de l'enregistrement des positions
Bouton B	D5	Entrée numérique (digital)	En mode manuel : déplacement 5° en bas En mode auto : Interrompt la boucle ou modifie le mouvement
Bouton REG	D2-D5	Entrée numérique (digital)	Simule l'appuis simultané des deux boutons A et B
Virtual terminal	D1	Entrée numérique (digital)	Affichage des données (angle, bouton, position poignet)
LED	D8	Sortie numérique (digital)	S'allume brièvement lors de l'enregistrement, ou en continu en mode lecture des séquences automatique
Alimentation	5V / GND	—	Alimente les différents composants de notre montage (potentiomètres, LED, etc.)

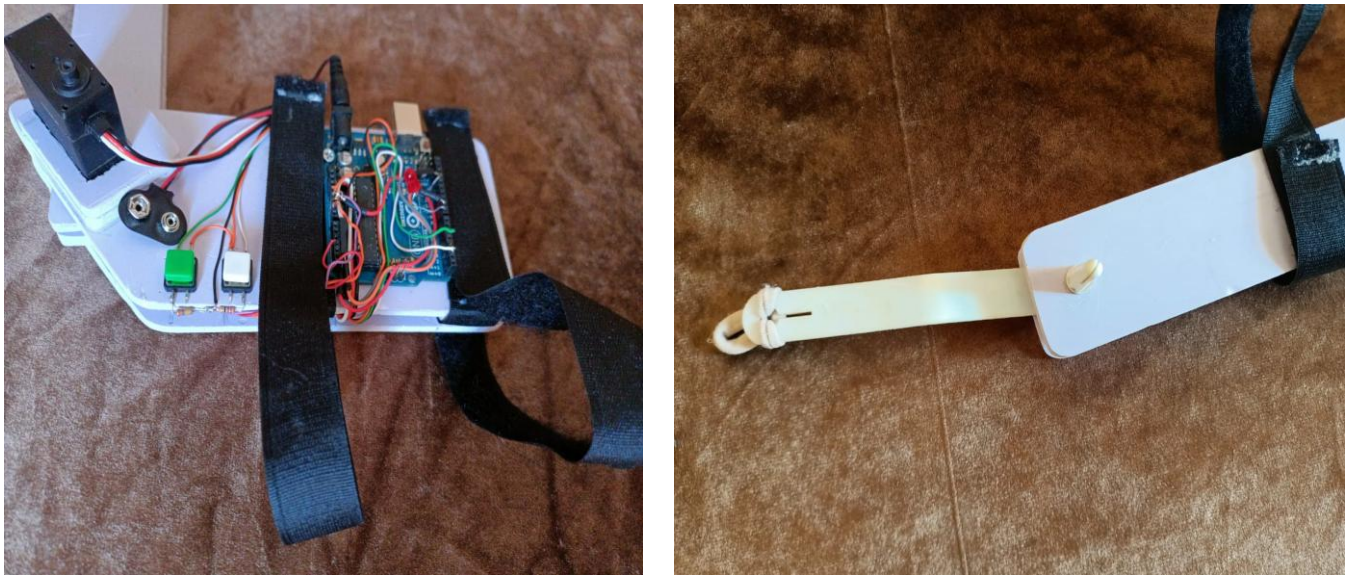


Figure.III.9. : câblage du système et mise en place du potentiomètre

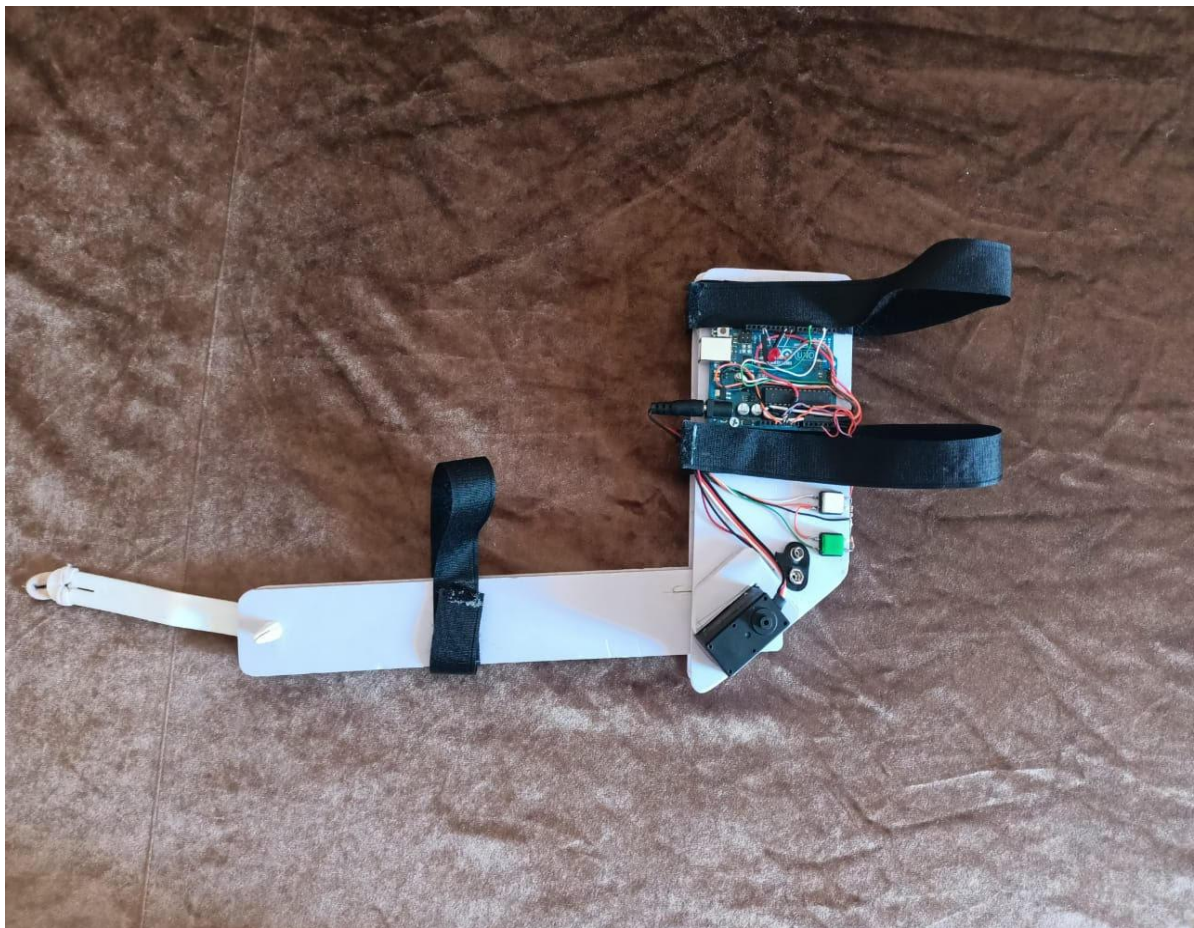
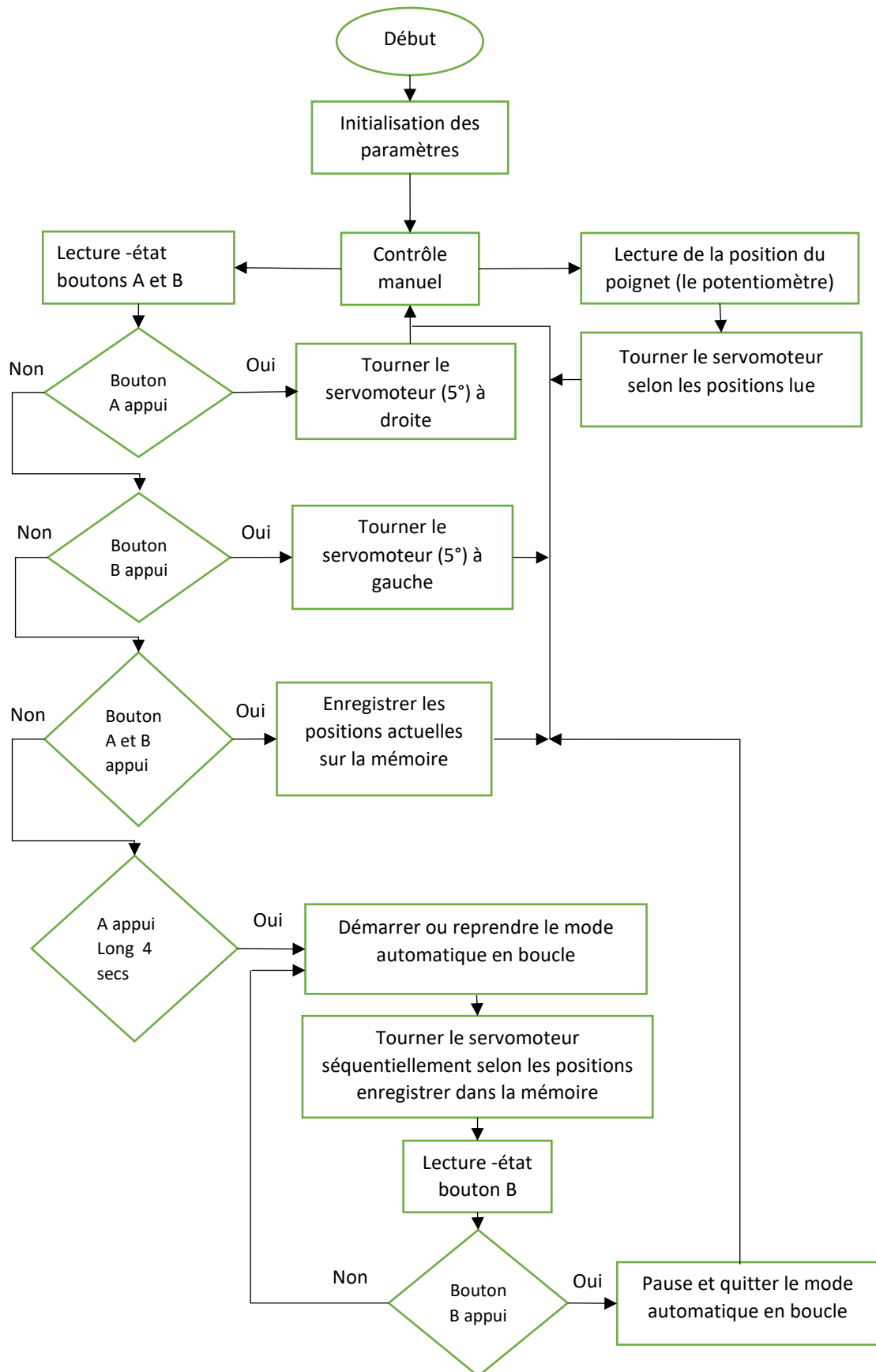


Figure.III.10. : photo du prototype réalisé

III.5 Organigramme de mode programmation :



III.6 Guide de la commande du montage pour la rééducation :

- ✓ 1/ Installation du servomoteur sur le coude pour permettre le mouvement mécanique du bras exosquelette
- ✓ 2/ Un potentiomètre placé au niveau du poignet est utilisé pour régler et définir les positions angulaires précises souhaitées pour la rééducation.
- ✓ 3/ Intégration de deux boutons poussoir pour permettre le contrôle manuel de la montée (**A**) et de la descente (**B**) du bras exosquelette par un pas de 5 degrés.
- ✓ 4/ Lorsqu'on appuie simultanément sur les boutons **A** et **B**, la position actuelle est enregistrée dans la mémoire pour créer un tableau de séquence de mouvement de rééducation.
- ✓ 5/ Une longue pression (3sec) sur le bouton **A** lance la lecture automatique des positions enregistrées, permettant le changement angulaire sans intervention de l'utilisateur.
- ✓ 6/ En appuyant sur le bouton **B** pendant la lecture en mode auto permet au système d'entrer en pause, une nouvelle pression sur le bouton **A** fait reprendre la lecture à partir de la position arrêtée.

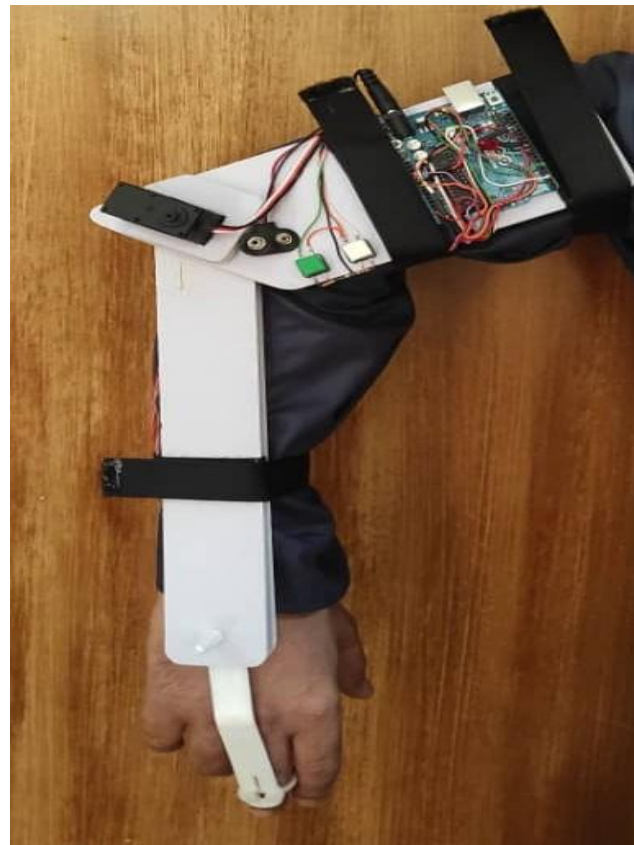


Figure.III.11. : utilisations réelles du bras robotique exosquelette

Cette photo illustre l'exosquelette porté au niveau du bras, montrant l'intégration complète du système pour un usage réel en contexte de rééducation.

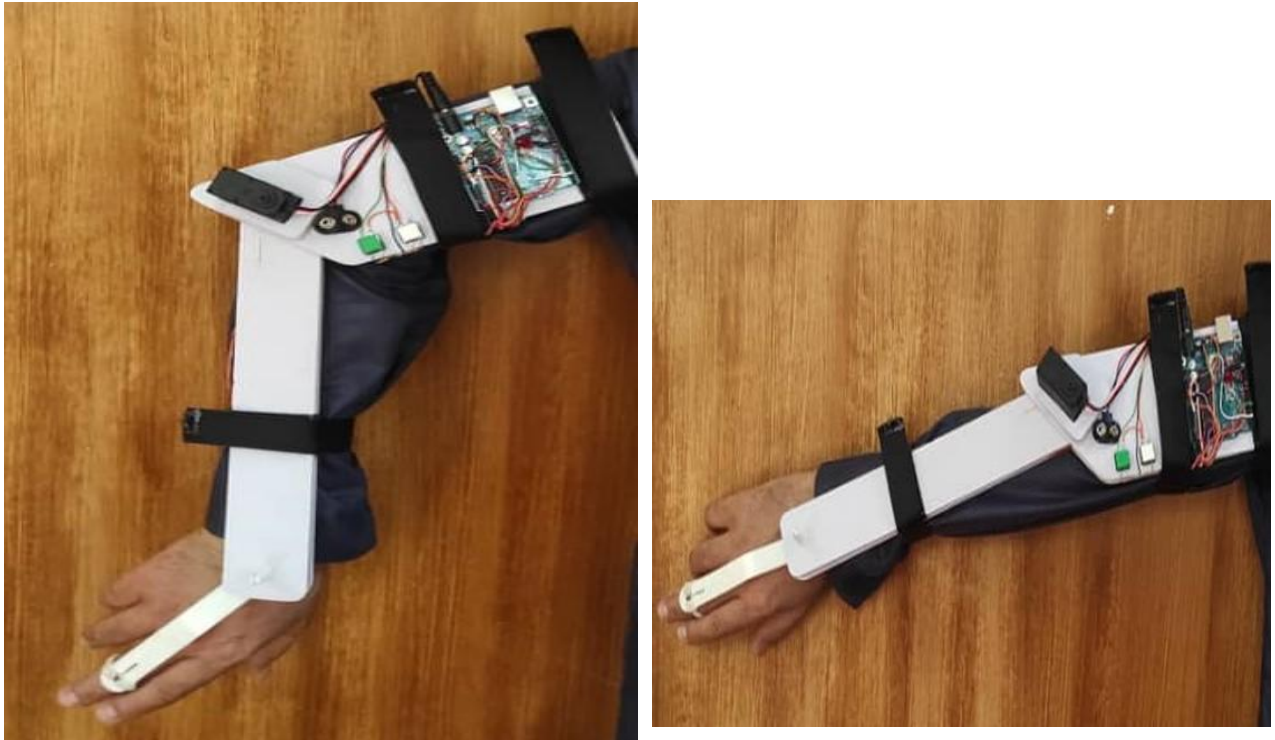


Figure.III.12. : Mouvement du bras lors du soulèvement du poignet

. L'utilisateur incline le poignet vers le haut, ce qui entraîne la montée progressive du bras robotique. Cette commande est détectée par le potentiomètre situé au poignet



Figure.III.13. : Mouvement du bras lors de l'abaissement du poignet

Lorsque le poignet est incliné vers le bas, le système interprète ce mouvement pour abaisser progressivement le bras robotisé, suivant une logique naturelle d'interaction.

III.7 Résultats de simulation :

Afin de valider le fonctionnement du système de contrôle du bras exosquelette, plusieurs tests ont été réalisés en utilisant l'environnement de simulation Proteus et la pratique utilisant Arduino. L'affichage des résultats a permis de suivre les lectures angulaires et leur évolution ou déplacement dans le temps. Ces données ont été exploitées pour tracer des courbes illustrant les différents modes de fonctionnement (manuel et automatique)

Ci-dessous, quelques extraits de test :

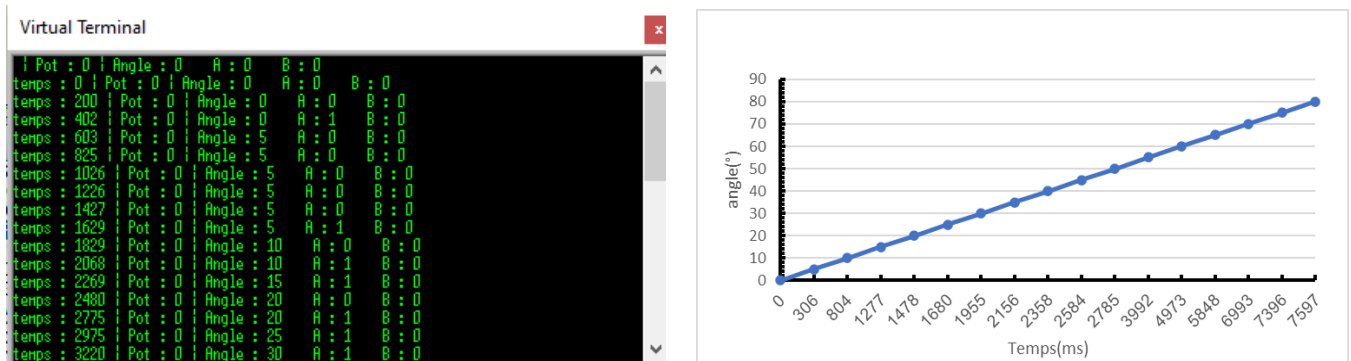


Figure III. 14. Evolution de l'angle sous contrôle manuel à l'aide des boutons (affichage terminal et courbe de progression).

La figure III-8, montre l'affichage des valeurs angulaires sur le terminal virtuel lors d'un contrôle manuel à l'aide des boutons. Le graphique associé illustre l'augmentation progressive de l'angle pas de 5°, mettant en évidence la lente montée de la position du bras en réponse aux actions de l'utilisateur

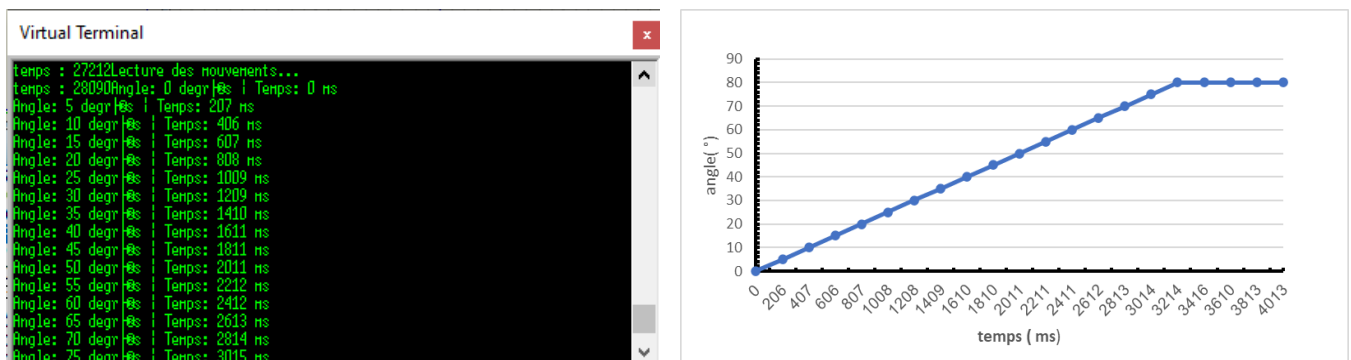


Figure III.15. Lecture angulaire d'une position enregistrée : (affichage terminal et courbe de progression).

Ces graphiques montrent l'évolution de la position angulaire du servomoteur lors de la lecture automatique d'un mouvement enregistré correspondant à un angle cible de 80° . On observe une montée progressive de l'angle par paliers en 5° , l'arrêt du graphique à 80 indique que le servomoteur a atteint la position cible et s'y est stabilisé pendant un certain temps avant d'attendre la prochaine instruction ou d'achever la séquence.

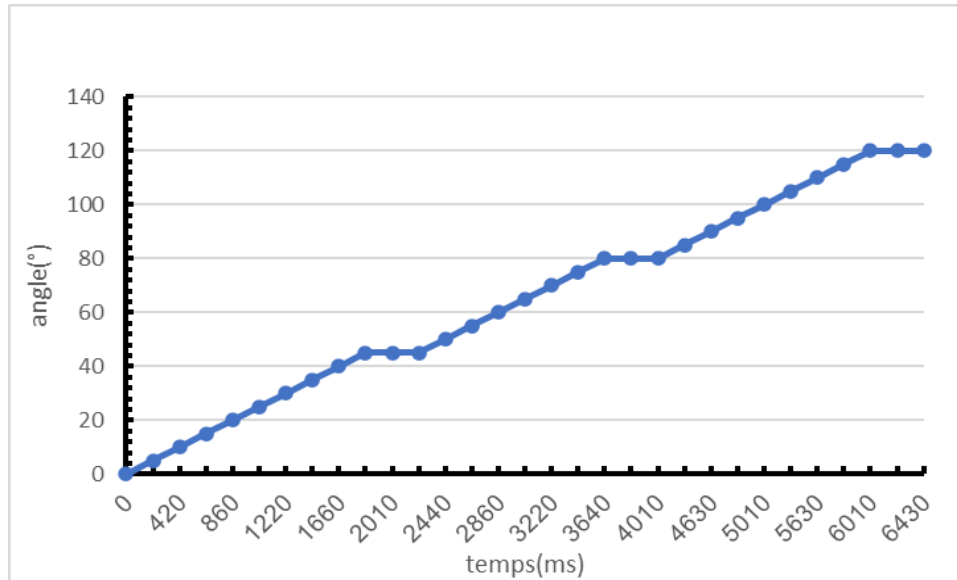


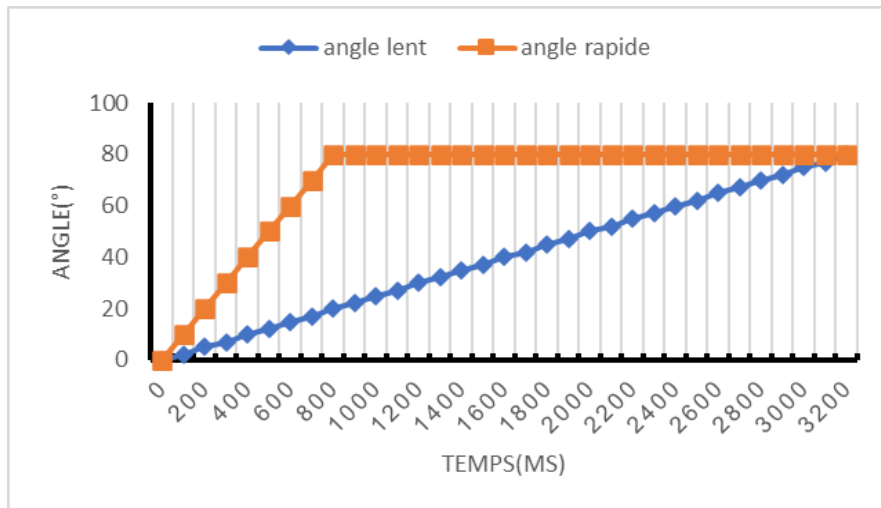
Figure III.16. Lecture progressive de chaque position ($45^\circ, 80^\circ, 120^\circ$)

Il est illustré sur la figure III-10, comment le servomoteur lit et exécute les positions enregistrées automatiquement dans le cadre d'un protocole de rééducation. On observe que chaque mouvement est réalisé progressivement par paliers de 5° , avec un arrêt de quelques centaines de millisecondes à chaque position cible ($45^\circ, 80^\circ, 120^\circ$), ce qui permet une exécution fluide et contrôlée, respectant le rythme de rééducation souhaité.

III.7.I Comparaison entre un mouvement rapide et un mouvement progressif du bras dans le contexte de la rééducation

À travers l'analyse des deux courbes représentant un mouvement vers un angle de 80° , on observe une différence marquée en termes de durée nécessaire pour atteindre cette position.

Dans le cas du mouvement rapide, l'angle atteint 80° en moins d'une seconde environ. Tandis que dans le cas du mouvement progressif, le bras atteint la même position de manière lente et graduelle, sur plusieurs secondes.



FigureIII.17. Comparaison entre deux mouvements vers 80°.

Ces différences ont un impact direct sur le confort et la sécurité du patient pendant une séance de rééducation, sachant que :

- **Dans le cas du mouvement rapide :** Le passage brusque à une nouvelle position. Peut entraîner des douleurs ou des tensions musculaires, notamment chez les patients souffrant de raideur articulaire ou de faiblesse musculaire. Le corps n'a pas suffisamment de temps pour s'adapter au changement, ce qui peut provoquer un stress mécanique indésirable
- **À l'inverse, dans le cas du mouvement progressif :** Le mouvement se fait en douceur, reproduisant de manière plus naturelle le geste humain. Il laisse au patient le temps de ressentir le mouvement, favorisant l'adaptation neuromusculaire et réduisant la douleur. Il est particulièrement recommandé dans les phases précoces de la rééducation, après une blessure ou une intervention chirurgicale.

Observation :

Dans la conception d'un bras robotique exosquelette pour la rééducation, il est essentiel d'opter pour un mouvement contrôlé et progressif, adapté aux capacités du patient. L'objectif n'est pas uniquement de produire un mouvement, mais de favoriser une récupération fonctionnelle sûre et efficace.

III.8 Comparaison entre le mode manuel et le mode automatique :

Critère	Mode manuel	Mode automatique
Contrôle	Par boutons physiques ou par potentiomètre	Lecture séquentielle de positions enregistrées
Flexibilité	Très flexible, intervention immédiate	Faible flexibilité pendant l'exécution
Précision	Bonne précision	Très précis grâce aux valeurs prédéfinies
Utilisation	Simple, intuitive	Nécessite une configuration préalable
Réutilisation thérapeutique	Peu adapté	Idéal pour la rééducation et les exercices répétitifs
Programmation	Facile	Complexité modérée
Analyse par courbes	Difficile à structurer	Permet une analyse temps-angle détaillée
Avantages	- Facilité - Contrôle direct	- Précision - Automatisation - Analyse possible
Inconvénients	- trop réactif - Non répétitif	- Moins réactif - Configuration requise

III.9 Conclusion :

À travers les différentes simulations et tests réalisés, nous avons pu observer et analyser le comportement du système d'exosquelette dans deux modes de commande : manuel et automatique. Chaque mode présente ses propres caractéristiques, avantages et limites selon l'objectif de la rééducation.

Les courbes générées ont permis de visualiser la progression angulaire en fonction du temps, illustrant la précision et la stabilité du mode automatique, ainsi que la flexibilité du mode manuel.

Ainsi, ce système démontre un potentiel prometteur pour l'assistance à la rééducation motrice, tout en soulignant l'importance d'un bon choix de mode selon les besoins thérapeutiques du patient.

Référence -Chapitre III :

- [1] BOUQUET Frédéric, BOBROFF Julien , « *Microcontrôleur arduino* », *Cours, Université Paris Sud, printemps 201.*
- [2] Erik BARTMANN , « *Le grand livre d'Arduino*», Eyrolles , Paris 20.
- [3] ANGELES Jorge , « *Fundamentals of robotic mechanical systems* », Springer, Livre,, 2000.
- [4] <https://fr.trustpilot.com/review/moussasoft.com>.
- [5] «. P. (. e. A. ». d. E. [. l. D. <http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php>.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a permis de concevoir et de développer un système de commande d'un bras exosquelette destiné à la rééducation des membres supérieurs. En combinant des capteurs tels que les potentiomètres et des interfaces simples comme les boutons-poussoirs, le patient peut contrôler les mouvements du bras de manière intuitive, tout en respectant ses capacités physiques.

L'approche adoptée vise à favoriser un mouvement progressif et sécurisé, mieux adapté aux besoins des patients en phase de rééducation. Les expérimentations ont montré que les mouvements doux et graduels sont non seulement plus confortables, mais aussi plus efficaces pour éviter la douleur et encourager la participation active du patient.

Ce projet ouvre ainsi la voie à des solutions de rééducation personnalisées, économiques et accessibles, pouvant être adaptées à différents profils de patients. Des perspectives futures incluent l'intégration de capteurs biomédicaux, l'apprentissage automatique pour adapter le mouvement au patient en temps réel, et l'amélioration d'ergonomie du dispositif.

Annexes

Caractéristiques de la carte Arduino UNO

Microcontrôleur	ATmega328P
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'entrée (recommandé)	7-12V
Tension d'entrée (limite)	6-20V
E/S numérique pins	14(dont 6 fournissent la sortie PWM représenter par le symbole tilde)
PWM numérique E/S pins	6
Pins d'entrée analogique	6 &
Courant DC par I O pin /	20 mA
Courant DC pour 3.3V Pin	50 mA
Mémoire flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisé par le bootloader (chargeur d'amorçage)
Mémoire SRAM	2 KB (ATmega328P)
Mémoire EPFROM	1 KB (ATmega328P)
Vitesse de l'horloge	16 MHz
Longueur	68.6 mm
Largeur	53.4 mm
Poids	25 g

Code du programme :

```
#include <Servo.h>

const int pinServo = 9;    // Broche du servo-moteur
const int pinPot = A3;     // Broche du potentiomètre
const int boutonA = 2;     // Bouton A
const int boutonB = 5;     // Bouton B
const int pinLED = 8;     // LED connectée à la broche 8

const int pasAngle = 5;    // Incrément d'angle pour le contrôle manuel
const int angleMin = 0;    // Angle minimum du servo
const int angleMax = 180;  // Angle maximum du servo
const int maxMouvements = 10; // Nombre maximum de positions enregistrables

int angleActuel = 0;
int ancienneValeurPot = 0;
int mouvements[maxMouvements]; // Tableau pour stocker les mouvements
int indexMouvements = 0;
int timeposition = 2500; // 1000 ms = 1 seconde

Servo monServo;

unsigned long tempsDebutAppuiA = 0;
unsigned long tempsDebutAppuiB = 0;
bool lectureEnCours = false;
```

Annexes

```
int dernierIndexLu = 0;    // Pour reprendre la lecture à l'endroit correct
bool enPause = false;     // Indique si la lecture est en pause

void setup() {
    monServo.attach(pinServo);
    pinMode(boutonA, INPUT);
    pinMode(boutonB, INPUT);
    pinMode(pinLED, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    int valeurPot = map(analogRead(pinPot), 0, 1023, angleMin, angleMax);
    int etatBoutonA = digitalRead(boutonA);
    int etatBoutonB = digitalRead(boutonB);

    Serial.print(" | Pot : "); Serial.print(valeurPot);
    Serial.print(" | Angle : "); Serial.print(angleActuel);
    Serial.print("   A : "); Serial.print(etatBoutonA);
    Serial.print("   B : "); Serial.println(etatBoutonB);

    // --- Enregistrement d'une position ---
    if (etatBoutonA == HIGH && etatBoutonB == HIGH) {
        if (indexMouvements < maxMouvements) {
            mouvements[indexMouvements] = angleActuel;
            indexMouvements++;
            Serial.print(indexMouvements);
            Serial.println(" Position enregistrée !");

            digitalWrite(pinLED, HIGH);
            delay(200);
            digitalWrite(pinLED, LOW);
            delay(500); // Anti-rebond
        }
    }

    // --- Lecture ou contrôle manuel après une pause ---
    if (etatBoutonA == HIGH && etatBoutonB == LOW && !lectureEnCours) {
        // Mesure de la durée d'appui sur le bouton A
        tempsDebutAppuiA = millis();
        while (digitalRead(boutonA) == HIGH); // Attendre le relâchement
        unsigned long dureeAppui = millis() - tempsDebutAppuiA;

        if (dureeAppui < 200) {

            // Si l'appui est court : ne pas relancer la lecture, juste augmenter l'angle
            angleActuel += pasAngle;

        } else {
            // Appui long → lecture des mouvements si disponibles
            if (indexMouvements > 0) {
                lectureEnCours = true;
                enPause = false;
                digitalWrite(pinLED, HIGH);
                Serial.println("Lecture des mouvements...");
            }
        }
    }
}
```

```
bool lectureActive = true;

while (lectureActive) {
  for (int i = dernierIndexLu; i < indexMouvements; i++) {
    if (digitalRead(boutonB) == HIGH) {
      if (tempsDebutAppuiB == 0) tempsDebutAppuiB = millis();
      if (millis() - tempsDebutAppuiB > 200) {
        Serial.println("Lecture interrompue !");
        dernierIndexLu = i;
        enPause = true;
        lectureActive = false;
        digitalWrite(pinLED, LOW);
        break;
      }
    } else {
      tempsDebutAppuiB = 0;
    }

    int angleCible = mouvements[i];
    int pas = (angleCible > angleActuel) ? 1 : -1;
    for (int a = angleActuel; a != angleCible; a += pas) {
      monServo.write(a);
      delay(20); // Vitesse ajustable
    }
    angleActuel = angleCible;
    delay(2500);

    Serial.print("Lecture angle : ");

    Serial.println(angleCible);

  }

  if (!enPause) {
    dernierIndexLu = 0;
  }
}

lectureEnCours = false;
} else {
  Serial.println("Aucun mouvement enregistré pour lecture !");
}
}

// --- Contrôle manuel avec bouton B uniquement ---
if (etatBoutonB == HIGH && etatBoutonA == LOW) {
  angleActuel -= pasAngle;
}

// --- Contrôle par potentiomètre ---
if (abs(valeurPot - ancienneValeurPot) > 6) {
  angleActuel = valeurPot;
  ancienneValeurPot = valeurPot;
}
```

```
angleActuel = constrain(angleActuel, angleMin, angleMax);  
monServo.write(angleActuel);  
  
delay(200);  
}
```