

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

UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAIA

Faculté de technologie

Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa

Projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de Master
Option : Automatique et informatique industrielle

Présenté par :

BENKHELLAT MASSINISSA

CHELABI BILLAL

Thème

**Conception et réalisation d'un bras manipulateur à base
de l'ARDUINO**

Devant le Jury:

CHEBI	Hocine	MAB	U-Bejaïa	Promoteur
MENDIL	Boubekeur	Pr	U-Bejaïa	Président
GUENOUNOU	Wahib	MCA	U-Bejaïa	Examineur

Année Universitaire : 2017/2018

REMERCIEMENTS

*Avant de rédiger notre projet de fin d'étude, nous tenons à présenter nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé pour l'élaboration de notre projet et nous voudrions bien exprimer notre reconnaissance et gratitude à notre promoteur **M. CHEBI HOCINE**, pour leur orientation et pour nous avoir aussi guidé tout au long de notre travail.*

Nous tenons à remercier également nos familles et Amis pour leur présence tout au long de ce dernier semestre d'études, leur soutien pendant la rédaction, leurs critiques et leurs consignes,

Ainsi que chacun des membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, mon frère et ma sœur, que ce travail soit témoin de ma reconnaissance éternelle, de mon respect, de ma gratitude et surtout de mon amour pour eux

A toute ma famille qui ont été toujours là pour moi et qui m'ont tant soutenu

A mon binôme BENKHELAT MASSINISSA avec qui j'ai tant appris et avec qui j'ai passé une inoubliable année

A mes amis qui m'ont aidé tout le long de ce projet

Bilal.

Je dédie ce modeste travail :

À l'esprit de mon père, À très chère ma mère, mes frères et mes sœurs, que ce travail soit témoin de ma reconnaissance éternelle, de mon respect, de ma gratitude et surtout de mon amour pour eux

À toute ma famille qui ont été toujours là pour moi et qui m'ont tant soutenu

À mon binôme CHALABI BILAL avec qui j'ai tant appris et avec qui j'ai passé une inoubliable année

À celle qui m'est très chère

À mes amis qui m'ont aidé tout le long de ce projet.

Massinissa

Sommaire

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : NOTIONS GENERALES SUR LA ROBOTIQUE	03
I.1 INTRODUCTION.....	03
I.2. NOTIONS DE BASE SUR LES BRAS MANIPULATEURS	03
I.2.1. LES CONSTITUANTS TECHNOLOGIQUES D'UN ROBOT.....	03
I.2.2. ESPACE ARTICULAIRE (ESPACE DE COMMANDE)	04
I.2.3. ESPACE OPERATIONNEL (ESPACE DES TACHES)	04
I.2.4. LA STRUCTURE MECANIQUE D'UN ROBOT	04
I.2.5. LES ARTICULATIONS	05
I.2.6. CLASSIFICATION DES ROBOTS	06
I.2.7 MODELISATION DES ROBOTS MANIPULATEURS	07
I.3 LA TELEOPERATION	08
I.3.1 DEFINITION DE LA TELEOPERATION	08
I.3.2 LES PROBLEMES DE LA TELEOPERATION	09
I.3.3 LA TELEROBOTIQUE	09
I.4 COMMANDE PAR UNE CARTE ELECTRONIQUE ARDUINO	10
I.5 CONCLUSION.....	11
CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE	12
II.1 INTRODUCTION	12
II.2 MODELISATION GEOMETRIQUE	13
II.2.1 INTERET DE LA MODELISATION GEOMETRIQUE	13
II.2.2 MODELE GEOMETRIQUE DIRECT	14
II.2.3 CALCUL DE MODELE GEOMETRIQUE DIRECT DU NOTRE BRAS	14
II.2.3.1: METHODE DE DENAVIT-HARTENBERG	15
II.2.4 TEST DU MODELE GEOMETRIQUE DIRECT DE NOTRE BRAS SOUS MATLAB	20
II.2.5 MODELE GEOMETRIQUE INVERSE	21
II.2.5.1 METHODE DE CALCUL DE MODELE GEOMETRIQUE INVERSE	21
II.2.5.2 CALCUL DE MODELE GEOMETRIQUE INVERSE DU NOTRE BRAS.....	22
II.2.6 TEST DE MODELE GEOMETRIQUE INVERSE DU NOTRE BRAS SOUS MATLAB	22

II.3 MODELISATION CINEMATIQUE	23
II.3.1. MODELE CINEMATIQUE DIRECT	23
II.3.1.1. LE JACOBIEN DE BASE	24
II.3.1.2 CALCUL DU MODELE CINEMATIQUE PAR DERIVATION DU MGD DU NOTRE ROBOT	24
II.3.2.MODELE CINEMATIQUE INVERSE	25
II.3.2.1 METHODE DE CALCUL DU MODELE CINEMATIQUE INVERSE	26
II.3.2.2 CALCUL DU MODELE CINEMATIQUE INVERSE DU NOTRE ROBOT.....	26
II.4 CONCLUSION	27
CHAPITRE III : REALISATION MECANIQUE ET ELECTRIQUE DU BRAS ARTICULES	28
III.1 INTRODUCTION	28
III.2 ETUDE DE MOUVEMENT DU BRAS	28
III.3 CONCEPTION DU BRAS SOUS SOLIDWORKS	28
III.4 CHOIX DES MATERIAUX ET PASSAGE A L'USINAGE	30
III.5 TRANSMISSION PAR PIGNON (LES ENGRENAGES).....	30
III.6 CAPTEUR DE POSITION	33
III.6.1 TYPE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	33
III.6.2 INCORPORATION DES CAPTEURS DANS LA STRUCTURE	34
III.7 LES ACTIONNEURS	35
III.7.1 PRESENTATION DU MOTEUR A COURANT CONTINU	35
III.7.2 INCORPORATION DES MOTEURS	37
III.8 L'ASSEMBLAGE DU BRAS ARTICULE	37
III.9 CARACTERISTIQUE DU BRAS ARTICULE.....	38
III.10 PARTIE ELECTRIQUE ET ETAGE DE COMMANDE.....	39
III.10.1 PHASE DE CONCEPTION.....	39
III.10.2 ENVIRONNEMENT DE LA PROGRAMMATION.....	41
III.10.3 REALISATION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE DE L'ETAGE DE COMMANDE.....	42
III.11 CONCLUSION	43
CONCLUSION GENERALE	44
BIBLIOGRAPHIE	45

LISTE DES FIGURE

Figure I.1: Constituants technologique du robot.....	03
Figure I.2: Structure mécanique d'un robot.....	05
Figure I.3: Articulations.	05
Figure I.4: Articulations.....	06
Figure I.5: Robot (RRRR)	06
Figure I.6: Robot (RRP)	06
Figure I.7: Robot (RPR)	07
Figure I.8: Robot (RPP)	07
Figure I.9: Robot (PPP)	07
Figure I.10: Exemple de Téléopération par la réalité virtuelle.....	09
Figure I.11: Illustration d'un système Carte ARDUINO UNO.....	10
Figure II.1: Modèle géométrique inverse.....	14
Figure II.2: Schéma des mouvements du bras.....	16
Figure II.3: Liaisons selon DENAVIT-HARTENBERG.....	17
Figure II.4: Orientation de l'outil de travail	19
Figure III.1: Principe de mouvement du robot.....	28
Figure III.2: Pièces principales qui constituent le robot.....	29
Figure III.3: Assemblage final de robot sous SolidWorks.....	30
Figure III.4: Image des engrenages	31
Figure III.5: Engrenage a denture droite.....	31
Figure III.6: Incorporation des engrenages (ART1)	33
Figure III.7: Potentiomètre multitour.....	33
Figure III.8: Schéma de principe d'obtention de position.....	34
Figure III.9: Incorporation de capteur (ART2)	34
Figure III.10: Moteur à courant continu.....	35
Figure III.11: Le stator.....	35
Figure III.12: Le rotor	35
Figure III.13: Couple de force.....	36
Figure III.14: Moteur pour ART 2.....	37
Figure III.15: Moteur pour ART 1.....	37
Figure III.16: La structure mécanique finale du bras articulé RPPR.....	38
Figure III.17: Schéma synoptique de l'étage de commande.....	41
Figure III.18: Schéma Interface IDE ARDUINO	42
Figure III.19: Schéma électrique de l'étage de commande.....	43

Liste des tableaux

Tableaux II.1: Paramètres DENAVIT-HARTENBERG du notre bras1	17
Tableaux III.2: Paramètres des engrenages du 1 art.....	32
Tableaux III.3: Caractéristiques techniques du bras articule.....	39

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
F	La force.
F_{em}	Force électromotrice.
n	Vitesse de rotation « en tr/min ».
Ω	Vitesse de rotation « en rd/s ».
C	Couple.
C_m	Couple moteur.
C_r	Couple résistant.
C_u	Couple utile.
a	Rapport cyclique.
f	Fréquence « en Hz ».
MLI	Modulation Large Impulsion « PWM en anglais ».
MCC	Machine a Courant Continu.
OT	Organe terminal.
TAO	Téléopération Assistée par Ordinateur.
MGD	Modèle Géométrique Directe.
MGI	Modèle Géométrique Inverse.
MCD	Modèle Cinématique Directe.
MCI	Modèle Cinématique Inverse.
SI	Système d'information.
CAN ou ADC	Convertisseur Analogique Numérique.
ICSP	In-Circuit serial programming.
DDL	Degrés De Libertés.
CPU	Unité Centrale de Traitement « central processing unit en anglais ».
TCP/IP	Transmission control protocol / Internet protocol

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'homme a toujours voulu concevoir une machine à son image qui le remplace pour exécuter des tâches difficiles dans des milieux hostiles.

Afin d'augmenter les cadences de production dans l'industrie, l'amélioration de la qualité des produits manufacturés, le rythme de travail où la qualité exigée ne pouvant être pris en charge à main humaine, l'industrie a remplacé l'homme par des robots qui se chargent de réaliser le même travail, avec des résultats plus performants, tant au plan de la précision, du rendement que de la qualité du produit fini.

Le robot est un système mécanique polyarticulé et multifonctionnel capable de remplacer ou d'assister l'homme dans les opérations effectuées en milieu hostile, soulever des charges lourdes, les déplacer rapidement avec une bonne précision de façon répétitive,etc. L'automatisation ou la robotisation industrielle s'est orientée vers l'utilisation des robots spécialisés et spécifiques. Ces robots seront conçus pour un accomplissement optimal de la tâche désirée par l'utilisateur.

Aujourd'hui le monde a connu un développement technologique extraordinaire, induisant un effort considérable en termes d'innovation dans différents domaines de la robotique et par conséquent se traduisant par la création de systèmes de plus en plus adaptés et complexes. C'est la commande des robots figurant dans ces nouveaux concepts qui ont le plus évolué. Celle-ci est vite devenue nécessaire et incontournable pour de nombreuses applications, dont, notamment le secteur de l'industrie.

L'intérêt majeur de ce projet est attribué à un robot manipulateur permettant le contrôle et la commande d'accès à distance grâce à la communication par l'ARDUINO notre projet permet à une personne d'évoluer dans une activité sensori-motrice de façon naturelle, dans un environnement créé numériquement qui peut être imaginaire ou une simulation de certains aspects du monde réel.

La conception de robots plus performants nécessite l'élaboration de modèle mathématique approprié.

Trois classes des modèles mathématiques permettent de couvrir l'ensemble des tâches exécutées par les robots industriels :

- Le modèle géométrique ;
- Le modèle cinématique ;
- Le modèle dynamique.

Pour ce qui est de notre projet de fin d'études nous avons étudié, conçu et réalisé un robot manipulateur à quatre degrés de liberté de type : une articulation rotoïde, après deux prismatiques une verticale et l'autre horizontale, et la quatrième est rotoïde pour l'orientation de l'organe terminal, les articulations sont actionnées par des moteurs à courant continu. Ce robot est commandé par PC à travers une ARDUINO, elle sera utilisée à des fins de simulation de tâches et pour la téléopération du robot.

Nous avons rapporté notre travail dans ce mémoire que nous l'avons structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre est consacré à une introduction générale, à des notions fondamentales sur les bras manipulateurs.

Le deuxième chapitre traite des modèles géométriques et cinématiques de notre robot.

Le troisième chapitre concerne la conception de la structure mécanique du bras articulé et des différentes étapes suivies pour la réaliser. Et décrit la partie électronique et les étapes à suivre pour réaliser les cartes de commande, de puissance et l'alimentation.

Chapitre I : Notions générales sur la robotique

CHAPITRE I: Notions générales sur la robotique

I.1 Introduction

Les robots sont actuellement très répandus dans l'industrie, particulièrement en construction d'automobile et chez la plupart des fabricants d'ordinateurs. Capables d'effectuer rapidement des tâches complexes avec une grande précision, ils sont notamment utilisés dans les chaînes de fabrication et de montage. On les emploie également dans des environnements où l'homme ne peut pas intervenir directement, soit parce que le milieu est hostile (nucléaire, sous-marin, spatial...), soit parce qu'il est inaccessible à son échelle (micromanipulation, microchirurgie...). Pour telles applications l'homme a utilisé l'outil informatique tel que la commande à distance, la réalité virtuelle, la téléopération, la réalité augmentée ou l'interface haptique.

I.2. Notions de base sur les bras manipulateurs

Les notions de base des bras manipulateur sont exprimées dans la section suivante :

I.2.1 Constituants technologiques d'un ROBOT

Un bras manipulateur est un ensemble des segments mécaniques, reliés par des liaisons appelées articulations. Chacune de ces liaisons est articulée par un actionneur qui sera soit électrique, hydraulique ou pneumatique. [1]

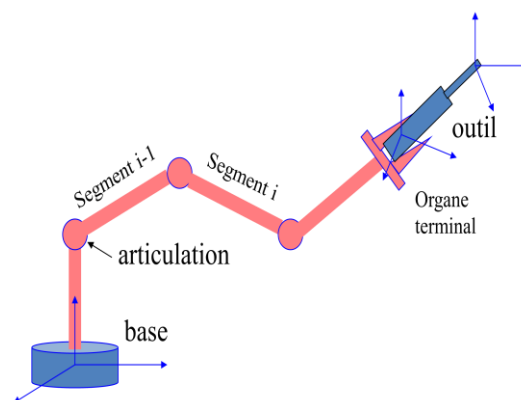


Figure I.1. Constituants technologiques du robot.

L'énergie nécessaire aux actionneurs est fournie par une unité de puissance et le tout est contrôlé par une console de commande. À l'extrémité des robots, on a généralement un outil de travail (pince, torche à souder, etc...) servant à faire une opération particulière. On

l'appelle aussi organe terminal (OT).

I.2.2 Espace articulaire (espace de commande)

On peut définir l'espace articulaire ou configuration d'un bras manipulateur comme l'espace qui nous permet de décrire sa configuration à un instant donné. Sa dimension N est égale au nombre de variables articulaires indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique (nombre des articulations pour une structure à chaîne continue ouverte).

I.2.3 Espace opérationnel (espace des tâches)

L'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal relativement à un référentiel $\{R_0\}$. La dimension de cet espace ($m \leq 6$) est égale au nombre minimale des coordonnées opérationnelles qui permettent de définir la position et l'orientation de l'organe terminal (au maximum 3 dans le plan et 6 dans l'espace) suffisante pour l'exécution d'une tâche [1].

I.2.4 Structure mécanique d'un robot

La structure mécanique d'un robot est composée de plusieurs corps (appelés aussi segments ou bras) connectés les uns aux autres par des liaisons appelées articulations ou joints. Cette structure mécanique peut constituer :

1. Une chaîne continue ouverte simple : aucun retour mécanique d'un segment à un autre dans la chaîne (figure I.2.a).
2. Une chaîne arborescente : ils existent plusieurs organes terminaux qui agissent en parallèle (figure I.2.b).
3. une chaîne complexe ou fermée: il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne (figure I.2.c). Les bras manipulateurs conçus sur la base d'une mécanique du type chaîne complexe ont pour avantage essentiel :
 - Une grande précision en mode programmé.
 - Rigidité élevée.
 - Meilleur équilibrage statique.

Les bras manipulateurs à chaîne continue ouverte et à chaîne arborescente sont les plus nombreux. Ces bras manipulateurs sont moins compliqués sur le plan conception car sans risques d'hyper-statisme, largement exploitées. Ces structures ont donné naissance à plusieurs générations de robots pratiquement chez tous les constructeurs, tel que les robots parallèles.[2]

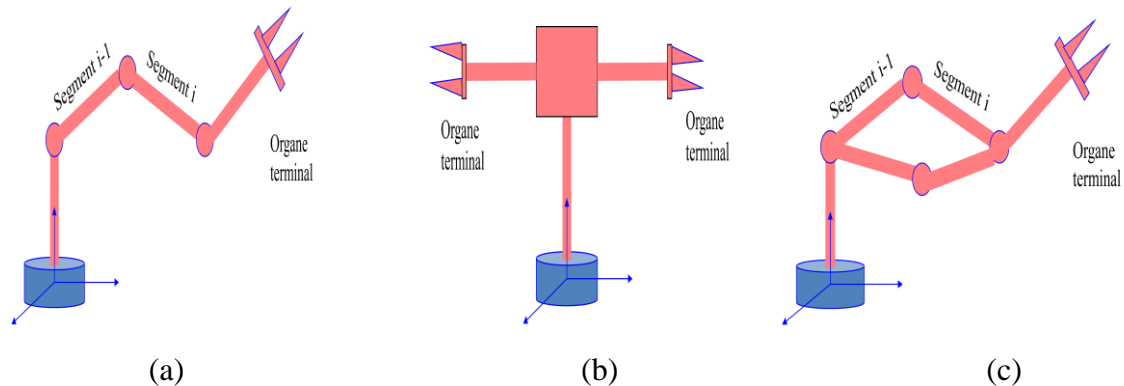


Figure I.2. Structure mécanique d'un robot : (a) Chaîne ouverte simple. (b) Chaîne arborescente. (c) Chaîne complexe.

I.2.5 Articulations

Une articulation est une liaison qui lie deux corps successifs du robot en limitant le nombre de degrés de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit M le nombre de degré de libertés résultant, encore appelé mobilité de l'articulation.[3]

La mobilité est tel que : $0 < M < 6$. Lorsque $M=1$, ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est dite simple, soit rotoïde ou prismatique.

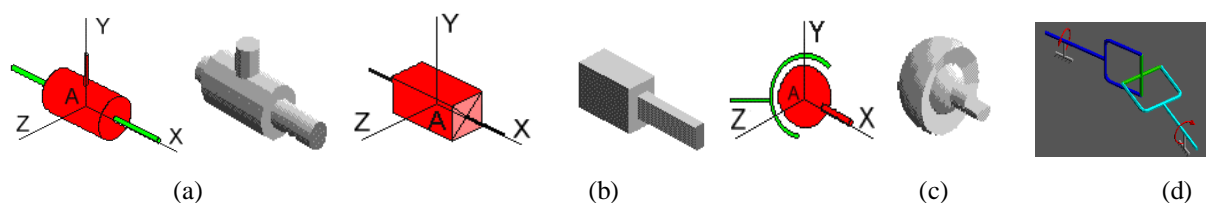


Figure I.3. Articulations : (a) Rotoïde, (b) Prismatique, (c) Sphérique, (d) Universelle.

Il s'agit d'une articulation de type pivot, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe [2].

Il s'agit d'une articulation de type glissière, réduisant le mouvement entre deux corps à

une translation le long d'un axe commun .La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe [2].



Figure I.4. Autres articulations.

I.2.6 Classification des robots

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

1) Anthropomorphe (quatre rotations)

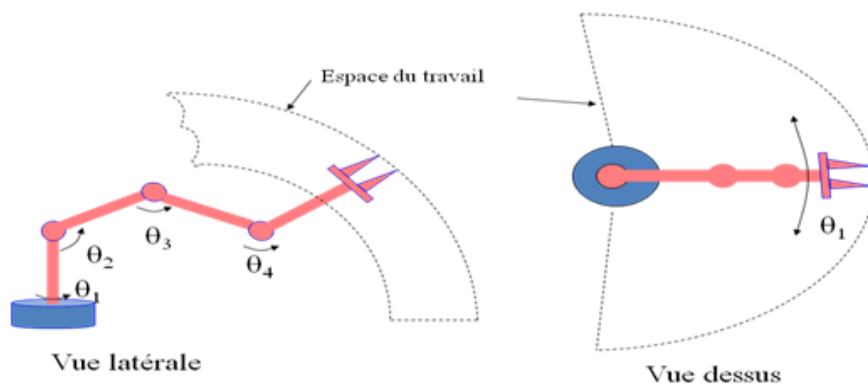


Figure I.5. Robot (RRRR).

2) Sphérique (2 rotations – 1 translation) :

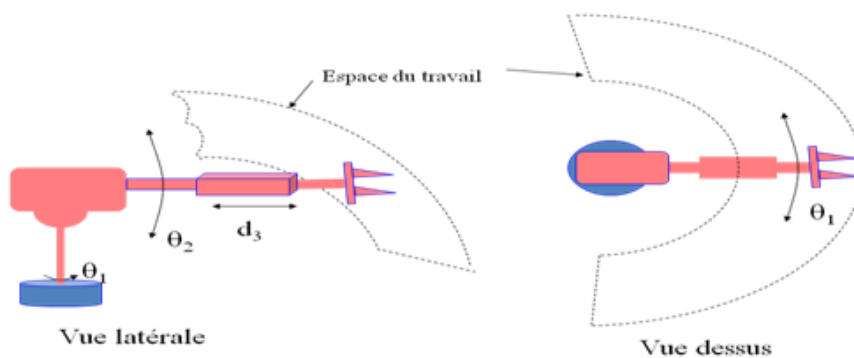


Figure I.6. Robot (RRP).

3) Torique (rotations – translation - rotation) :

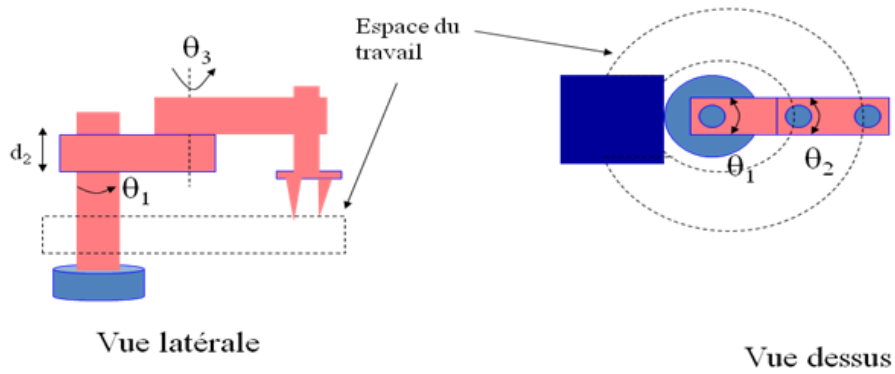


Figure I.7 Robot (RPR).

4) Cylindrique (rotations – 2 translations) :

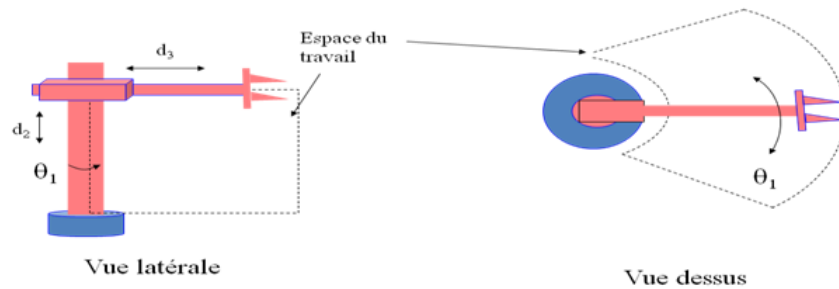


Figure I.8. Robot (RPP).

5) Cartésien (trois translations) :

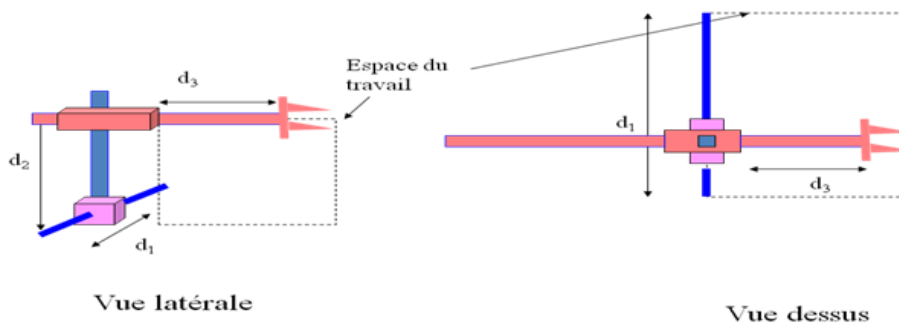


Figure I.9. Robot (PPP).

I.2.7 Modélisation des robots manipulateurs

Une fois que l'utilisateur du robot a précisé les caractéristiques de la tâche à réaliser et le volume atteignable par le robot, alors nous pouvons choisir le robot le plus adapté à cette tâche. Il nous restera à déterminer les valeurs des paramètres du robot qui sont :

- Les longueurs des segments du robot.
- Les valeurs maximales des angles pour les liaisons de rotations.

- Les valeurs maximales des longueurs pour les liaisons de translations.
- Les vitesses maximales de rotations et translations.
- Les accélérations maximales des rotations et des translations.
- Les masses des segments.
- Les forces appliquées par chaque moteur sur les articulations.

Les valeurs de ces paramètres seront requises pour une bonne exécution de la tâche. Pour déterminer les valeurs de ces paramètres, il nous faut élaborer le modèle du robot. Ce modèle nous permettra d'ajuster ces valeurs après simulation jusqu'à obtenir leurs valeurs optimales pour une bonne exécution de la tâche. Les modèles les plus couramment rencontrés sont :

1. le modèle géométrique direct et inverse (lorsque la tâche doit être précise sans être rapide).
2. Le modèle cinématique (lorsque la tâche doit être rapide mais moins précise).
3. Le modèle dynamique (lorsque la tâche fait appel à des vitesses importantes avec des variations importantes) il permet de prendre en compte les effets dynamiques dus aux grandes vitesses et accélérations.

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée, la difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée (nombre de degrés de libertés et le type des articulations).[3]

I.3 Téléopération

I. 3.1 Définition de la téléopération

La Téléopération désigne les principes et les techniques qui permettent à l'opérateur humain d'accomplir une tâche à distance, à l'aide d'un système robotique d'intervention (dispositif esclave), commandé à partir d'une station de contrôle (dispositif maître), par l'intermédiaire d'un canal de télécommunication (figure I.10).[4]

Elle a pris ses origines dans le besoin de prolonger le geste de l'homme au delà de la main.

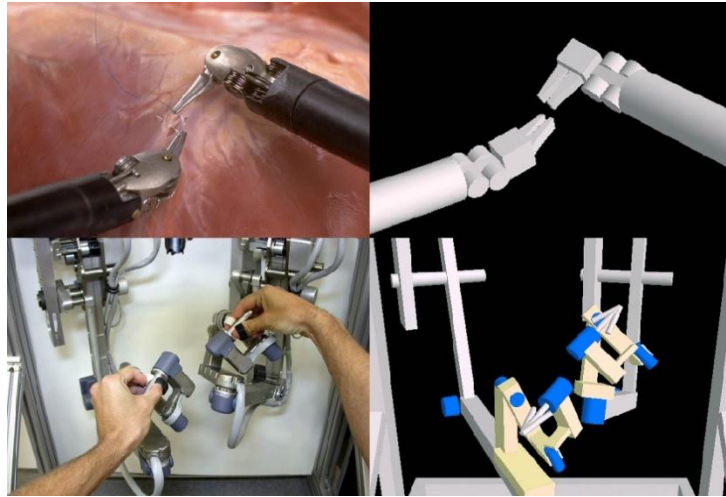


Figure I.10. Exemple de Téléopération par la réalité virtuelle

I.3.2 Problèmes de la téléopération

Un certain nombre de problèmes de fond et complexes existent encore. Nous citerons par exemple :

Parmi les problèmes de la téléopération :

- Les délais (retards) de transmission ;
- La réalisation d'une transparence idéale ;
- La prise en compte du facteur humain et sécurité ;
- L'autonomie et partage de commande.

Plusieurs approches et concepts ont été proposés pour améliorer et faire évoluer les systèmes de téléopération. Parmi elles, Nous pouvons citer la Téléopération Assistée par Ordinateur qui représente le mode d'interaction homme-machine que l'on retrouve généralement dans la plupart des systèmes de téléopération.

La Téléopération Assistée par Ordinateur (TAO) : est vue comme une voie intermédiaire entre la téléopération bas niveau et la supervision. L'objectif de la TAO est de réaliser à chaque instant et pour toute étape de la tâche, une exploitation optimale des ressources d'un ordinateur. La TAO bénéficie actuellement de l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée.

I.3.3 Télérobotique

La télérobotique est une forme de téléopération lorsque l'opérateur réalise des tâches à distance en utilisant un robot. Ce dernier peut fonctionner d'une façon autonome.

I.4 Commande par une carte électronique ARDUINO

La carte ARDUINO est une carte électronique programmable très facilement. C'est une plateforme open source (ce qui veut dire que ses concepteurs ont publié librement les plans de fabrication de la carte pour les mettre à disposition de tout le monde. Ainsi chacun peut créer sa propre carte électronique). Elle permet de développer un grand nombre de projets passant par la domotique (avec le réglage d'éclairage ou le contrôle d'appareils domestiques), la robotique avec le pilotage de robot ou de drone) ou des projets d'informatique embarqué (station météo, satellite ...etc.) [01]. La carte ARDUINO UNO se présente comme ceci :

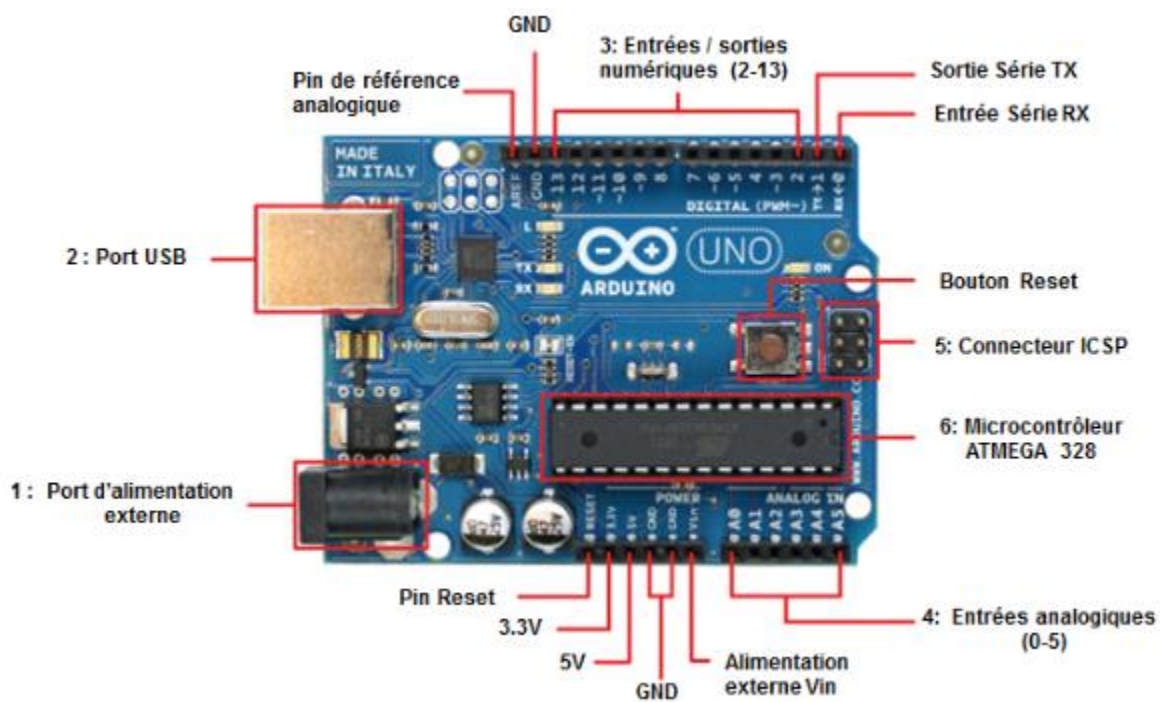


Figure I.11. Illustration d'un système Carte ARDUINO UNO [01].

1 : Port d'alimentation externe Pour fonctionner, la carte a besoin d'une alimentation qui est comprise entre 6 et 20 V. On conseille en général de l'alimenter plutôt entre 7 V et 12V pour garder une marge en basse tension et éviter que le circuit ne chauffe trop (car le régulateur de tension disperse toute surtension en chaleur). Cette tension doit être continue et peut par exemple être fournie par une pile 9V. Un régulateur se charge ensuite de réduire la tension à 5V pour le bon fonctionnement de la carte.

2 : Port USB Permet de communiquer avec la carte et de l'alimenter en 5V.

3 : Les entrées/sorties numériques 4 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une

sortie PWM peuvent actionner de nombreux composants (LED, transistor, etc.) mais elles ne peuvent pas fournir beaucoup de courant (40 mA pour une carte ARDUINO UNO). Pour piloter des circuits de plus forte puissance, il faut passer par des transistors ou des relais.

4: Les entrées analogiques de 0 à 5 sont contrairement aux connecteurs numériques qui ne peuvent accepter que deux états, les sorties analogiques au nombre de 6 peuvent elles accepter un grand nombre de valeurs (de 0 à 1023 plus exactement). On branchera par exemple sur celles-ci une LED elle même reliée à un potentiomètre pour faire varier sa luminosité. A noter qu'une carte ARDUINO ne peut pas fournir en sortie plus de 40 mA (Ampères).

5: Connecteur In-Circuit Serial Programming ICSP pour le téléchargement du programme [2]. Pour l'utiliser, il suffit de la relier à un ordinateur avec un câble USB ou encore de l'alimenter à l'aide d'un bloc secteur externe ou de piles.

On a choisi les cartes arduino car c'est un domaine qu'on connaît peu et avec lequel on semble être le moins à l'aise. Malgré cela, j'ai le pré-sentiment que cette carte est un très bon outil pédagogique pour développer des ateliers d'initiation (atelier robotique par exemple). Bien que petite par sa taille elle me semble pouvoir ouvrir un grand champ des possibles [1].

6 : Le micro contrôleur de carte ARDUINO.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions de base sur les bras manipulateurs, et la téléopération. Ainsi nous avons donné un aperçu sur la commande par carte ARDUINO. Le prochain chapitre sera dédié aux modélisations et détermination de modèle mathématique.

Notre travail rentre dans le cadre de la robotique et la commande, qui est l'étude, conception et réalisation d'un bras manipulateur à quatre degrés de liberté de type RPPR, cette architecture est la plus utilisée dans l'industrie (assemblage, déplacement d'objet, ...).

Chapitre II : Modélisation mathématique

CHAPITRE II: MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

Pour commander le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer d'un modèle mathématique. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées.

Les modèles mathématiques nécessaires sont :

- les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et inversement.
- les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment les vitesses de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et leurs dérivés.
- les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses, accélérations des articulations et paramètres du robot (masse des segments, moment d'inertie...).

Les difficultés de la réalisation reposent sur les points suivantes [5] :

- Complexité de la cinématique.
- Le nombre de degrés de liberté.
- Type d'articulation (prismatique ou rotoïde).
- Type de chaîne (ouverte, simple, arborescente ou fermée).

Pour obtenir un bon modèle il faut :

- Mettre en œuvre des procédures efficaces d'identification et de leurs paramètres constitutifs.
- Pour qu'une commande puisse être effectivement implémentée sur un contrôleur de robot, les modèles doivent être calculés en ligne et donc le nombre d'opérations à effectuer doit être minimum.

II.2 Modélisation géométrique

Un bras manipulateur est considéré comme une chaîne de segments rigides interconnectés entre eux par le biais des articulations rotoïdes ou prismatiques.

Le modèle géométrique est l'étude analytique de la géométrie du robot et de son outil de travail par rapport à un référentiel fixe sans prendre en compte les vitesses, les forces et les moments.

Il y'a deux problèmes fondamentaux dans la modélisation géométrique :

- 1) Soit un robot avec un vecteur articulaire $q = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n]$ et des paramètres géométriques (longueurs, ...), quelle est la position et l'orientation de son outil de travail par rapport à un référentiel fixe R_0 : ceci est le modèle géométrique direct.
- 2) Soit les paramètres du robot, pour une position et orientation de l'outil de travail du robot / R_0 , quelles sont les valeurs des variables articulaires qui permettent d'atteindre cette position dans le cas où c'est possible mécaniquement (modèle géométrique inverse). [6]

II.2.1 Intérêt de la modélisation géométrique

Si nous fixons une position et une orientation, le modèle géométrique inverse nous donnera les valeurs des variables articulaires permettant cette position et cette orientation. L'intérêt d'une telle modélisation réside dans son utilité dans deux domaines qui sont : -La commande - La conception et la simulation. [3]

- 1) **Commande** : La commande consiste à envoyer des tensions qui agissent sur les moteurs des N articulations du robot avec des angles bien définies qui permettent à l'outil de travail de se positionner à l'endroit choisi et de s'orienter à la manière voulue. Le modèle géométrique inverse nous permet de calculer les valeurs des variables articulaires en donnant la position et l'orientation de l'outil de travail. Ces variables articulaires seront envoyées sous forme de tension aux moteurs des articulations du robot.

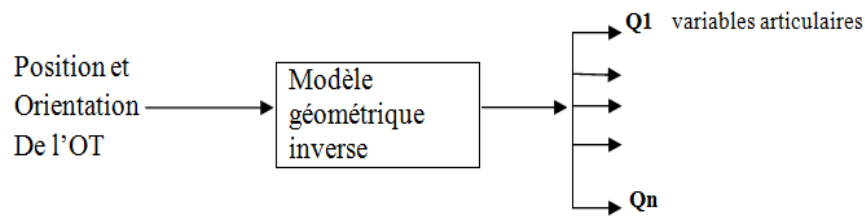


Figure II.1. Modèle géométrique inverse.

- 2) Conception et la simulation :** Lors de l'étape de conception d'un robot, nous devons connaître l'ensemble des tâches qu'il doit réaliser, la précision avec laquelle il doit exécuter ces tâches. Une fois que le choix des paramètres est fait (nombre de degrés de liberté, type d'articulations, longueurs des segments), nous utilisons le modèle géométrique pour analyser ces performances quant à l'exécution de ces tâches. Il faut noter que la modélisation géométrique est utilisée surtout pour sa précision dans le positionnement et l'orientation de l'outil de travail à faibles vitesses, elle n'est efficace que pour cette tâche puisque la contrainte de temps est exclue, contrairement à la modélisation cinématique et dynamique.

II.2.2 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct permet de connaître la situation du robot (position et orientation de l'outil de travail du robot OT), en fonction de sa configuration, grâce à la relation entre les coordonnées opérationnelles et les coordonnées généralisées. [6]

$$X = f(q) \quad (II.2)$$

- X : Vecteur $[6 \times 1]$ coordonnées opérationnelles (trois coordonnées pour la position, et trois pour l'orientation) exprimées par rapport au repère R_0 .
- q : Vecteur $[n \times 1]$ coordonnées généralisées, n = nombre de degré de liberté.

II.2.3 Calcul du modèle géométrique direct du notre bras

Il existe plusieurs méthodes matricielles pour calculer le MGD telle que les transformations homogènes, nous intéressons dans notre étude à la méthode de DENAVIT-HARTENBERG.

II.2.3.1 Méthode de DENAVIT-HARTENBERG

Cette méthode destinée à systématiser la modélisation de n'importe quel type de robot série. [5]

Ses principaux avantages sont :

- Simplification maximale du modèle géométrique.
- Etablissement d'une norme reconnue par tous.

A) Principe

Le principe de cette méthode est basé sur trois étapes essentielles :

- Fixer des repères à chaque corps du robot.
- Calculer les matrices homogènes entre chaque corps.
- Calculer la matrice homogène entre base et organe terminal.

B) Hypothèse

On suppose que le robot est constitué d'un chaînage de $n+1$ corps liés entre eux par n articulations rotoïdes ou prismatiques. A chaque corps, on associe un repère R_i . Les repères sont numérotés de 0 à n . La i éme articulation, dont la position est notée q_i , est le point qui relie les corps $i-1$ et i .

Le repère R_j fixé au corps C_j , est défini de sorte que :

- L'axe z_j est porté par l'axe de l'articulation j .
- L'axe x_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes z_i , $z_{(i-1)}$ sont parallèles ou colinéaires, le choix de x_i n'est pas unique.

Nous avons utilisé une architecture très répandue dans l'industrie des robots d'assemblage et téléopération, elle possède deux types d'articulations rotoïde et prismatique.

Le bras articulé a quatre degrés de liberté :

- Une rotation autour d'une base fixe.
- Une translation verticale.
- Une translation horizontale.
- Une rotation de l'organe terminal.

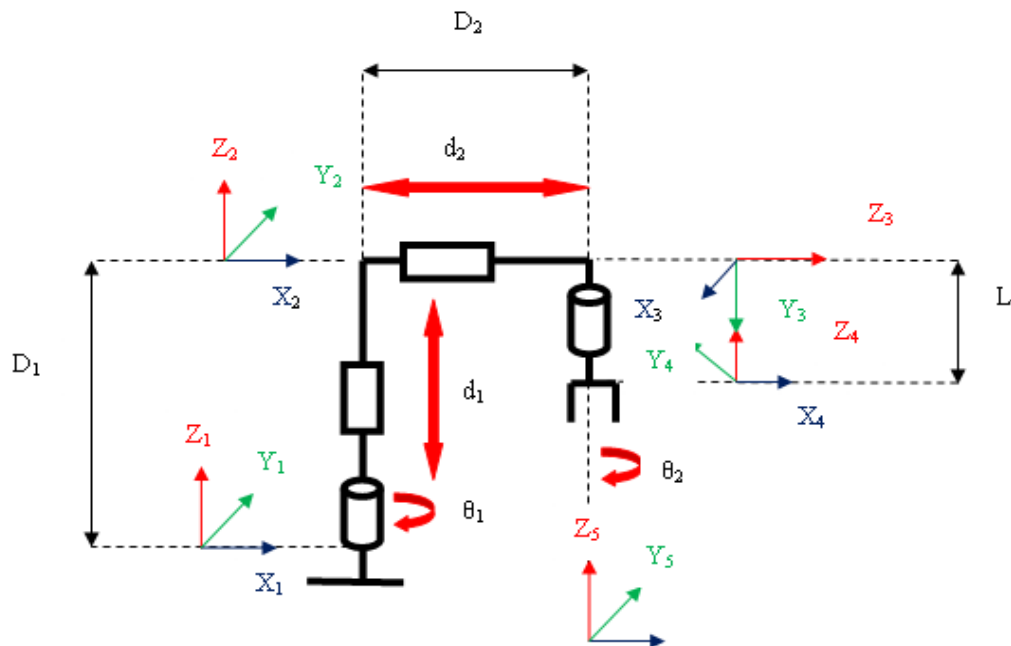


Figure II.2. Schéma des mouvements du bras

Avec :

$$-135 < \theta_1 < 135^\circ, \quad 0 < \theta_2 < 360^\circ, \quad 5 < D_1 < 27.5 \text{ cm}, \quad 7 < D_2 < 17 \text{ cm}, \quad L = 8 \text{ cm}.$$

C) Paramètres de Denavit-Hartenberg

Le passage de \$(R_i)\$ à \$(R_{i+1})\$ s'exprime en fonction des quatre paramètres suivants :

a_i : Longueur de la perpendiculaire commune aux axes des liaisons L_i et L_{i+1} .

d_i : Distance le long de l'axe, du support de X_i au support de X_{i+1} .

α_i : Angle entre Z_i et Z_{i+1} mesuré autour de X_{i+1} .

θ_i : Angle entre X_i et X_{i+1} mesuré autour de Z_{i+1} .

La position et l'orientation du corps C_i par rapport au corps C_{i-1} sont définies par la matrice de passage homogène $T_{i,i+1}$ du repère R_i (lié à C_{i-1}) au repère R_{i+1} (lié à C_i).

Cette matrice s'obtient en fonction des quatre paramètres de D-H, $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$.

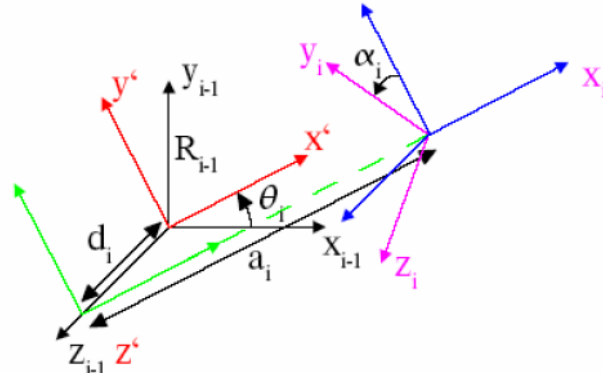


Figure II.3. Liaisons selon DENAVIT-HARTENBERG.

Paramètres DENAVIT-HARTENBERG pour notre robot sont représentées dans le tableau suivant:

	a_i	d_i	α_i	θ_i
T12	0	D1	0	θ_1
T23	D2	0	-90	0
T34	L	0	90	0
T45	0	0	0	θ_2

Tableau II.1. Paramètres DENAVIT-HARTENBERG du notre bras

Conformément au paramétrage de DENAVIT-HARTENBERG, la matrice de passage entre les corps C_{i-1} et C_i est donc :

$$T_{i,i+1} = \text{rot}(Z_i, \theta_i) \times \text{trans}(0, 0, d_i) \times \text{trans}(a_i, 0, 0) \times \text{rot}(X_i, \alpha_i) \quad (II.2)$$

$$T_{i,i+1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$$T_{i,i+1} = \begin{bmatrix} R_{i,i+1} & P_{i,i+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

La matrice $T_{i,i+1}$ résultante de la multiplication des matrices de passage $T_{i,i+1}$ nous permet d'obtenir la matrice de passage homogène du repère R_1 lié au bâti au repère R_n lié à l'organe terminal, où $R_{i,i+1}$ représente la rotation entre les repères R_{i+1} et R_i et $\Pi_{i,i+1}$ la translation entre ces mêmes repères.

Donc les matrices des passages élémentaires du bras sont :

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

$$T_{34} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

$$T_{45} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

La matrice de transformation globale est:

$$T = (T_{12} \times T_{23} \times T_{34} \times T_{45}) \quad (II.9)$$

$$T = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1\sin\theta_2 & -\sin\theta_1\cos\theta_2 & \cos\theta_1 & d_2 \cos(\theta_1) \\ \cos\theta_1\sin\theta_2 & \cos\theta_1\cos\theta_2 & \sin\theta_1 & d_2 \sin(\theta_1) \\ \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & -L + d_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

D) **Position de l'outil de travail** : D'après cette matrice la position de l'outil de travail :

$$\begin{cases} X_{ot} = d_2 \cos(\theta_1) \\ Y_{ot} = d_2 \sin(\theta_1) \\ Z_{ot} = d_1 - L \end{cases} \quad (I.11)$$

E) **Orientation de l'outil de travail** : Les Constructions des cosinus directeurs sont :

La matrice d'orientation de l'outil de travail par rapport au repère fixe est :

$$\begin{bmatrix} / & \vec{X}_1 & \vec{Y}_1 & \vec{Z}_1 \\ \vec{X}_0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \vec{Y}_0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \vec{Z}_0 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Cette matrice de rotation vérifie 6 relations parmi les 9.

Le vecteur de base \vec{X}_1 de la base R_1 s'exprime dans la base R_0 par la relation :

$$\vec{X}_1 = a_{11} \vec{X}_0 + a_{21} \vec{Y}_0 + a_{31} \vec{Z}_0 \quad (\text{II. 12})$$

Le vecteur $\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix}$ représente le vecteur unitaire \vec{X}_1 (du repère R_1)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \sin\theta_2 & -\sin\theta_1 \cos\theta_2 & \cos\theta_1 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_1 \\ \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I. 13})$$

On constat que l'orientation de l'outil de travail dépend essentiellement aux angles θ_1 et θ_2 , sachant que la pince tourne suivant l'axe \vec{Z}_1 , ce dernier est parallèle au l'axe \vec{Z}_0 .

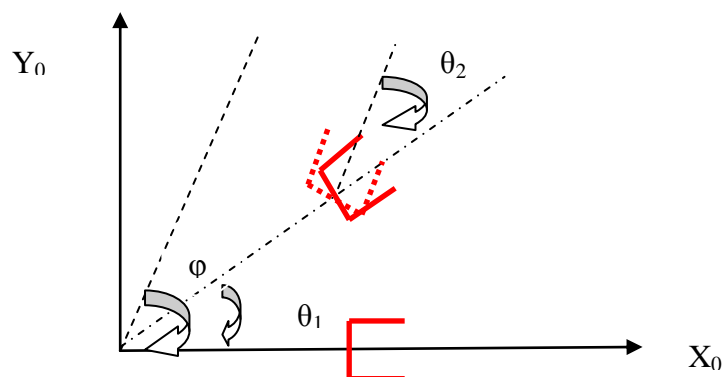


Figure II.4. Orientation de l'outil de travail

$$\text{D'où } \varphi = \theta_1 + \theta_2$$

Avec : φ est l'orientation de la pince suivant l'axe X_0 .

II.2.4 Test du modèle géométrique direct de notre bras sous MatLab

Avant de calculer le modèle géométrique inverse et le modèle cinématique du robot, il faut d'abord tester le modèle géométrique direct sous le logiciel MatLab pour des positions connues.

Script:

```
clear all
clc
syms th1 d1 d2 L th2

d1=40;
d2=40;
L=8;
th2=0;
th1=(pi/2);

T12=[cos(th1), -
sin(th1), 0, 0; sin(th1), cos(th1), 0, 0; 0, 0, 1, d1; 0, 0, 0, 1];
T23=[1, 0, 0, d2; 0, 0, 1, 0; 0, -1, 0, 0; 0, 0, 0, 1];
T34=[0, 0, 1, 0; 1, 0, 0, L; 0, 1, 0, 0; 0, 0, 0, 1];
T45=[cos(th2), -
sin(th2), 0, 0; sin(th2), cos(th2), 0, 0; 0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];
T=(T12*T23*T34*T45);

%*****
% Le modèle géométrique direct MGD
%*****

Xot=T(1,4)
Yot=T(2,4)
Zot=T(3,4)
```

$$\alpha = (\theta_1 + \theta_2) * 180 / \pi$$

Affichage:

$$X_{ot} = 2.4493e-015 \approx 0.$$

$$Y_{ot} = 40.$$

$$Z_{ot} = 32.$$

$$\text{Alpha} = 90.$$

Nous avons essayé quelques configurations auxquels on a obtenu des positions similaires au cas réel.

II.2.5 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) est l'ensemble des relations inverses à celle du modèle géométrique direct. Ce modèle permet d'exprimer les variables articulaires q du bras manipulateur en fonction des coordonnées opérationnelles X exigées pour l'exécution d'une tâche donnée. [6]

$$Q = f^{-1}(X) \quad (II. 14)$$

L'inversion sera jugée par 03 critères :

- Le modèle doit être très proche de la réalité ;
- Le temps de calcul du modèle doit être compatible avec la tâche ;
- Le modèle géométrique direct doit être inversible.

II.2.5.1 Méthode de calcul de modèle géométrique inverse

Il n'existe pas une méthode analytique générale qui permet de résoudre le MGI. Cependant un certain nombre de méthodes, adaptées à des classes de cinématiques particulières sont souvent citées en bibliographie et permettent de traiter le problème (méthode de PIEPER, méthode de PAUL, méthode de LEE, méthode de RAGHAN&ROUTH, et la méthode numérique). [6]

II.2.5.2 Calcul du modèle géométrique inverse de notre bras

Grâce à la nature des articulations (RPPR) de notre robot, et aussi en utilisant les règles de la trigonométrie nous avons pu calculer d'une manière mathématique le modèle géométrique inverse :

$$\theta_1 = \arctg(y/x)$$

$$d_1 = z + L$$

$$d_2 = x / \cos(\arctg(y/x))$$

$$\theta_2 = \alpha - \arctg(y/x)$$

II.2.6 Test du modèle géométrique inverse de notre bras sous MatLab

Pour assurer le bon fonctionnement du modèle géométrique inverse, nous avons testé quelques configurations pour des positions connues, grâce au programme établi sous MatLab qui va nous donner les différentes valeurs des articulations du robot en utilisant son MGI :

Script:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% TEST DU MGI %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
x=2.4493e-015;
y=40;
z=32;
alpha=pi/2;
L=8;
th1=atan(y/x);
th1degre=th1*180/pi
d1=z+L
d2=x/cos(atan(y/x))
th2=alpha-atan(y/x);
th2degre=th2*180/pi

```

Affichage:**th1degre = 90.****d1 = 40.****d2 = 40.0001.****th2degre = 0.****II.3 Modélisation cinématique**

La durée d'exécution d'une tâche est très importante dans la robotique ou plus exactement d'en être maître, d'où la nécessité de contrôler la vitesse. Le modèle cinématique nous donne la vitesse de position (translation de l'outil de travail) et la vitesse d'orientation (rotation de l'outil de travail) en fonction des différentes vitesses d'évolution des variables articulaires, il nous permettra donc de contrôler la vitesse d'exécution de la tâche.

II.3.1 Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct exprime les vitesses de translations et de rotation de l'effecteur \dot{X} d'un bras manipulateur (les variations élémentaires dx des coordonnées opérationnelles) en fonction des vitesses articulaires \dot{q} (des variations élémentaires dq des coordonnées articulaires)[4], il est noté :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = J \frac{\partial q}{\partial t} \quad (II.15)$$

Donc :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = J \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (II.16)$$

Avec $\dot{X} = [v_e, w_e]$; $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]$. Où $J(q)$ désigne la matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du bras manipulateur, égale à $\frac{dx}{dq}$ est en fonction des variables articulaires q .

L'intérêt du calcul de la matrice jacobienne : [6]

- a) En cinématique, on utilise la matrice jacobienne pour établir les relations liant les vitesses opérationnelles aux vitesses articulaires.

- b) Elle facilite le calcul des singularités et de dimension de l'espace opérationnel accessible au robot.

II.3.1.1 Jacobien de base

Le calcul de la jacobienne peut être mené de plusieurs façons :

- Par dérivation du modèle géométrique.
- Par le théorème de la décomposition des vitesses.
- Par la méthode du produit vectoriel.

Nous décrivons par la suite la première méthode d'obtention de la jacobienne, celle de la dérivation du modèle géométrique car pour notre cas elle semble moins difficile par rapport aux autres méthodes. [5]

II.3.1.2 Calcul du modèle cinématique par dérivation du MGD du notre robot

Le calcul de la matrice jacobienne peut se faire en dérivant le MGD, $X=f(q)$ pour obtenir la relation suivante :

$$j_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad i = 1, \dots, m ; j = 1; \dots, m \quad (\text{II. 17})$$

Où J_{ij} est l'élément (i,j) de la matrice jacobienne.

Cette méthode est fortement recommandée pour le calcul du MGI des robots à deux ou trois degrés de liberté.

Nous faisons appel au modèle géométrique direct calculé précédemment :

$$\begin{cases} X = d2 \cos (\theta 1) \\ Y = d2 \sin (\theta 1) \\ Z = -L + d1 \\ \varphi = \theta 1 + \theta 2 \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

Après dérivations par rapport au temps nous avons trouvé les expressions des vitesses opérationnelles en fonctions des vitesses articulaires :

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{d}_2 \cos\theta_1 - d_2 \dot{\theta}_1 \sin\theta_1 \\ \dot{Y} = \dot{d}_2 \sin\theta_1 + d_2 \dot{\theta}_1 \cos\theta_1 \\ \dot{Z} = \dot{d}_1 \\ \dot{\alpha} = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

La matrice jacobienne obtenue est :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_2 \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ d_2 \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

Donc le modèle cinématique direct de notre robot:

$$\begin{cases} V_x = -d_2 \sin\theta_1 W_1 + \cos\theta_1 V_2 \\ V_y = d_2 \cos\theta_1 W_1 + \sin\theta_1 V_2 \\ V_z = V_1 \\ W_x = W_1 + W_2 \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

II.3.2 Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse d'un bras manipulateur est celui qui permet de déterminer les vitesses articulaires \dot{q} qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle \dot{X} désirée à partir d'une configuration q donnée, il s'écrit :

$$\dot{q} = j^{-1}(q) * X \quad (\text{II. 22})$$

Le modèle cinématique inverse présente un grand intérêt en phase d'exploitation surtout quand le bras manipulateur travaille en cour de déplacement avec des contraintes de vitesses, de l'effecteur relativement à la pièce (opération de soudage, de découpage,).

L'autre intérêt qu'il se substitue au modèle géométrique inverse et permet de calculer les incréments de déplacements articulaires à réaliser sur les différentes articulations, sur la base de la configuration présente, pour matérialiser un déplacement élémentaire dans l'espace opérationnel.

II.3.2.1 Méthode de calcul du modèle cinématique inverse

Pour obtenir le modèle cinématique inverse nous avons deux méthodes : [6]

- Inverser le modèle cinématique direct et donc calculer $J^{-1}[q]$.
- Dériver le modèle géométrique inverse.

L'inversion de $J(q)$ n'est possible que si elle est carrée et que si son déterminant est non nul.

II.3.2.2 Calcul du modèle cinématique inverse du notre robot

Pour calculer le modèle cinématique inverse du notre bras, on va résoudre le système d'équations de modèle cinématique direct :

$$\begin{cases} V_x = -d_2 \sin\theta_1 W_1 + \cos\theta_1 V_2 \\ V_y = d_2 \cos\theta_1 W_1 + \sin\theta_1 V_2 \\ V_z = V_1 \\ W_x = W_1 + W_2 \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

D'après les quatre équations on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_x \cos\theta_1 + V_y \sin\theta_1 = V_2 \\ \frac{V_y}{d_2} \cos\theta_1 - \frac{V_x}{d_2} \sin\theta_1 = W_1 \\ V_1 = V_z \\ W_2 = W_x - \frac{V_y}{d_2} \cos\theta_1 + \frac{V_x}{d_2} \sin\theta_1 \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

Donc le modèle cinématique inverse est :

$$\begin{cases} W_1 = \frac{V_y}{d_2} \cos\theta_1 - \frac{V_x}{d_2} \sin\theta_1 \\ V_1 = V_z \\ V_2 = V_x \cos\theta_1 + V_y \sin\theta_1 \\ W_2 = W_x - \frac{V_y}{d_2} \cos\theta_1 + \frac{V_x}{d_2} \sin\theta_1 \end{cases}$$

II.4 Conclusion

Nous avons décrit la modélisation géométrique des robots manipulateurs, son grand intérêt dans la robotique, ainsi que le calcul par la méthode de Denavit-Hartenberg, et l'obtention du modèle géométrique inverse.

Nous avons défini par la suite, la modélisation cinématique et son intérêt dans la robotique, ainsi que son obtention grâce à la méthode de dérivation du MGD, qu'on a utilisé afin d'élaborer le modèle cinématique inverse. Ces modèles nous permettent d'élaborer une loi de commande cinématique afin de contrôler la vitesse de notre robot.

Chapitre III : Réalisation mécanique et électrique du bras articulé

CHAPITRE III: Réalisation mécanique et électrique du bras articulé

III.1 Introduction

Après une étude approfondie effectuées sur les tâches à accomplir par le robot (modélisation et détermination du modèle), nous avons entamé par conséquent la phase de la conception et la réalisation de la structure mécanique qui correspond à ces besoins.

III.2 Etude de mouvement du bras

Le bras articulé est constitué de quatre (4) degrés de libertés (DDL), la première articulation effectue un mouvement rotatif sur une base fixe autour d'un axe emboîté dans des roulements assurant une rotation optimale.

Les deux articulations suivantes forment un mouvement de translation verticale et horizontale à base de vis sans fin.

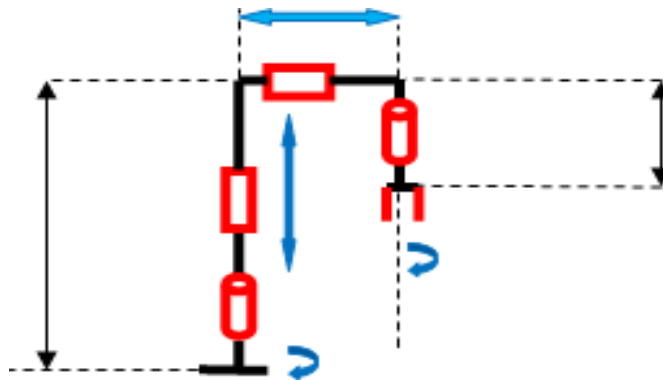


Figure III.1. Principe de mouvement du robot.

La quatrième articulation est de type rotoïde qui est réalisée à base d'engrenage réducteur couple/vitesse et une vis placée directement sur une pince (organe terminal).

III.3 Conception du bras sous Solidworks

La construction du bras articulé s'est faite au préalable avec une conception de la structure sous Solidworks, le logiciel nous a beaucoup apporté que ce soit sur la mise en plan des pièces pour l'usinage et aussi il nous a permis d'avoir un aperçu sur chaque pièce, d'en étudier les caractéristiques techniques (poids, dimensions, force exercée...etc.) et d'optimiser les fonctionnalités avant le passage à la réalisation. Nous décrirons dans ce qui suit les

différentes pièces formant le bras articulé ainsi que les mécanismes de fonctionnement. Le bras articulé est formé :

- un bâti fixe composé de deux disques ;
- deux segments de translation ;
- la quatrième articulation est composée de deux plaques superposées et des pignons.

La figure ci-dessous représente les différentes pièces conçues sous Solidworks (Figure III.2).

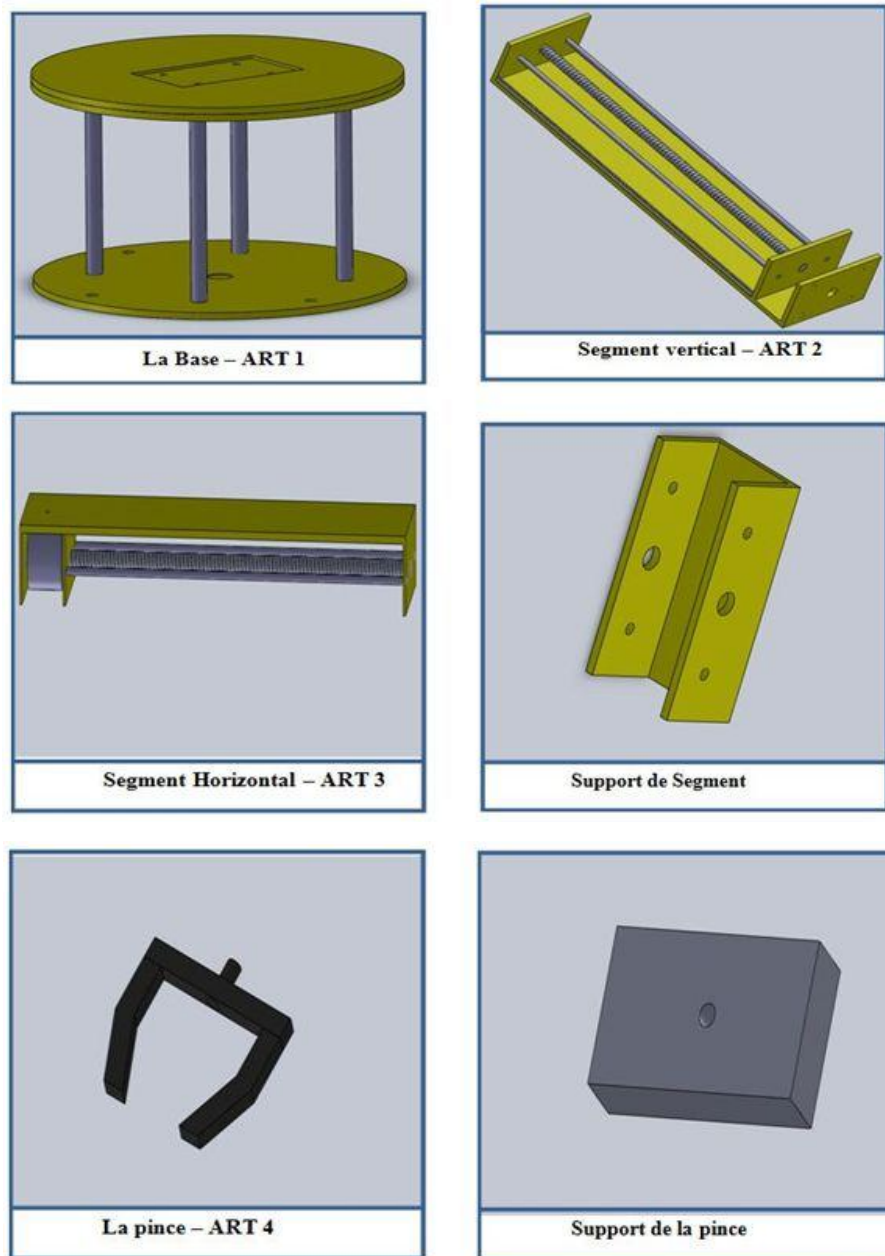


Figure III.2. Pièces principales qui constituent le robot.

Après la conception des différentes pièces sous Solidworks, nous avons l'assemblé pour produire la structure mécanique finale de notre bras, la figure III.3 illustre l'assemblage finale.

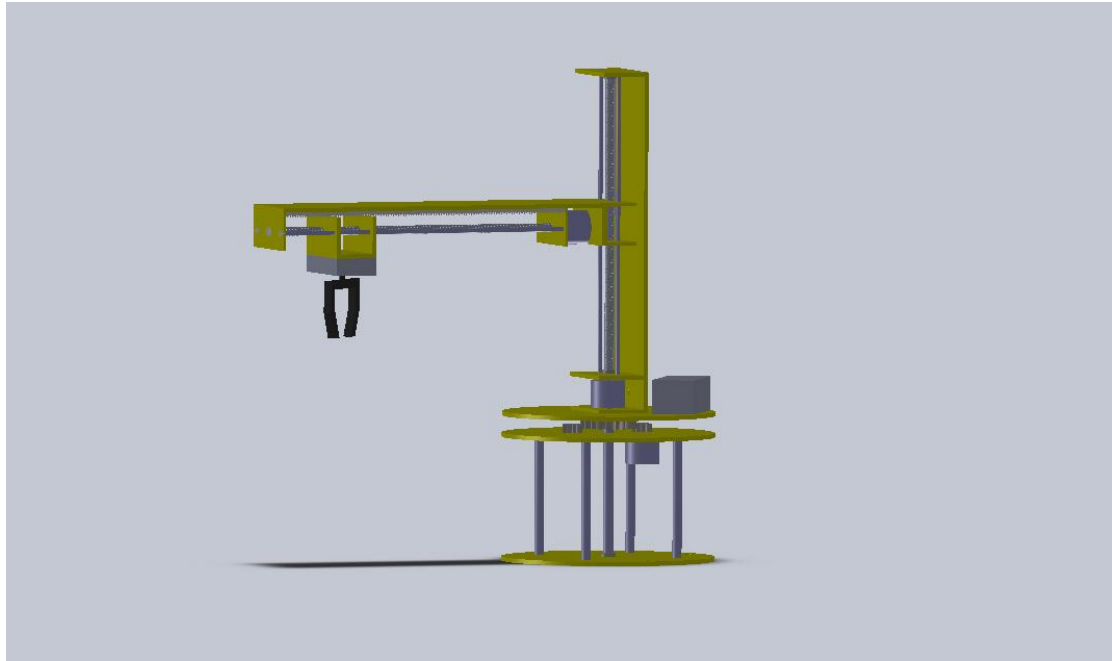


Figure III.3. Assemblage final de robot sous SolidWorks.

III.4 Choix des matériaux et passage à l'usinage

Pour des raisons de solidité et de disponibilité, on a construit les différentes pièces du bras articulé avec l'acier, sauf pour le segment horizontal, nous l'avons construit avec l'aluminium à cause du poids de l'acier qui est lourd, et donc il influe sur l'équilibre de notre robot. L'assemblage est fait à l'aide d'un système (Boulon, écrou). Pour ce qui est de la transmission du mouvement de rotation, on a opté pour l'utilisation des pignons en plastique dur, récupérés sur différentes machines à engrenage (Imprimantes matricielles, Robots mixeurs ...etc.) , pour les articulations prismatiques nous avons utilisé le principe de vis sans fin pour assurer un couple résistant qui peut supporter le poids de notre structure mécanique avec la charge en plus, et avec une vitesse importante.

III.5 Transmission par pignon (les engrenages)

Engrenage : est un système mécanique composé de deux roues dentées engrenées servant : (Figure III.4)



Figure III.4. Image des engrenages

soit à la transmission du mouvement de rotation entre-elles.

soit à la propulsion d'un fluide (on parle alors de pompe à engrenages).

Dans le cas de la transmission de mouvement, les deux roues dentées sont en contact l'une avec l'autre et se transmettent de la puissance par obstacle.

Il existe plusieurs types d'engrenage parmi eux :

- a) **Engrenage a roue et vis sans fin**
- b) **Engrenage cylindrique a denture droite**
- c) **Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale**
- d) **Engrenage conique**

Nous avons choisi le deuxième type pour une raison de disponibilité (récupération sur des veilles imprimantes) et compatibilité avec notre réalisation.

Engrenage cylindrique a denture droite :

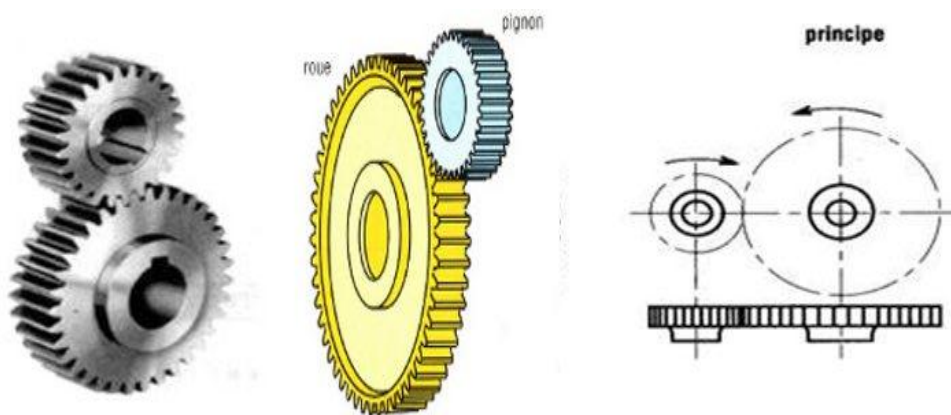


Figure III.5. Engrenage a denture droite

Le but d'utiliser ce type d'engrenage et de profiter de son bon rapport de réduction couple/vitesse qui peut supporter le poids de notre structure mécanique avec la charge en plus.

- rapport de transmission (vitesses) depuis un arbre d'entrée (e) vers un arbre de sortie (s) à travers un engrenage extérieur :

$$i = \frac{N_s}{N_e} = \frac{z_e}{z_s} = \frac{C_e}{C_s} \quad (III.1)$$

Avec :

- z : le nombre de dents,
- N : la vitesse de rotation quelle que soit l'unité (tr/min) (rad/s)...
- C : couple exprimé quelle que soit l'unité (N.m) (N.cm)...
- rapport de transmission d'un train d'engrenages :

$$i_{tot} = i_I \cdot i_{II} \cdot i_{III} \dots i_n \quad (III.2)$$

Pour notre structure nous avons besoin d'un couple important et une réduction de vitesse pour la première articulation, pour cela nous avons choisi les engrenages situés dans le tableau suivant :

	Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Nombre des dentes intérieures	Nombre des dentes extérieures
Arbre du moteur	-	10	-	20
Intermédiaire 1	X	X	X	X
Intermédiaire 2	X	X	X	X
Arbre de rotation	-	60	-	90

Tableau III.1 : paramètres des engrenages du 1 art

On applique la relation suivante :

$$\frac{V_{arbre}}{V_{moteur}} = \frac{N_{moteur}}{N_{exter1}} \cdot \frac{N_{inter1}}{N_{ext2}} \cdot \frac{N_{inter2}}{N_{arbre}} \quad (III.3)$$

Dans notre cas on n'a pas intégré les engrenages intermédiaires, on a associé l'arbre du moteur directement à l'arbre de rotation, donc la vitesse de l'arbre de rotation est égale à la vitesse du moteur.

Incorporation dans notre structure : Pour la première articulation nous avons utilisé un engrenage, nous avons aussi placé le moteur et le capteur (Figure III.6).

L'engrenage que nous avons placé sur l'axe de rotation permettent de :

- Associer le pignon du moteur avec le pignon du potentiomètre.
- Augmenter le couple utile.

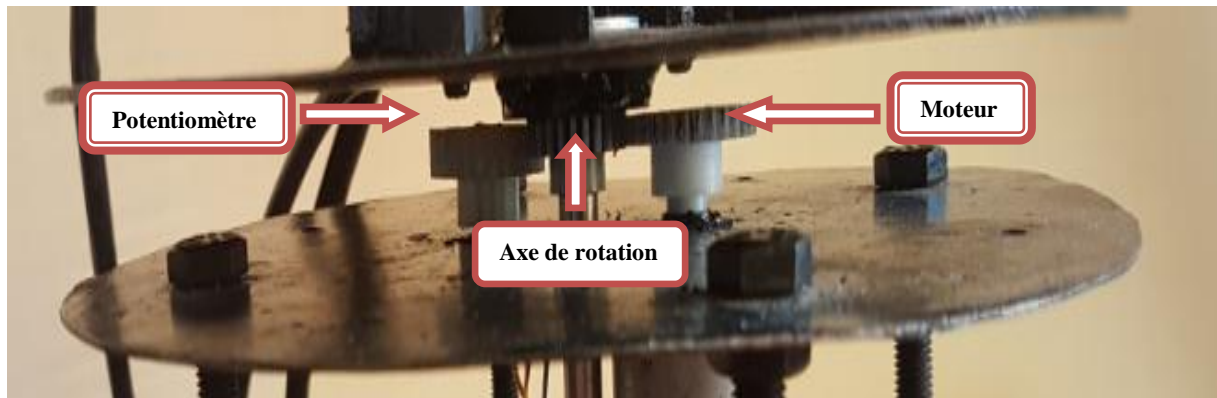


Figure III.6. Incorporation des engrenages (ART1)

III.6 Capteur de position

Pour detection la position d'orientation d'un robot, on arrivons a utilisé les capteurs a fonctionnment suivant :

III.6.1 Type et principe de fonctionnement

Le bras articulé effectue des mouvements de rotation, d'où des déplacements angulaires. Pour la mesure de la position instantanée de chaque articulation, nous avons opté pour les capteurs potentiométriques multitours dont le mouvement de l'axe n'est pas limité et dépasse 360° (Figure III.7).

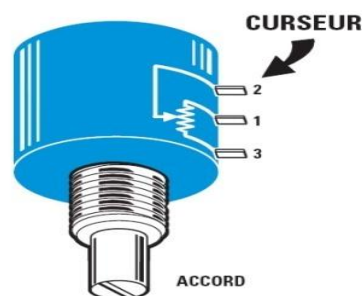


Figure III.7. Potentiomètre multitour

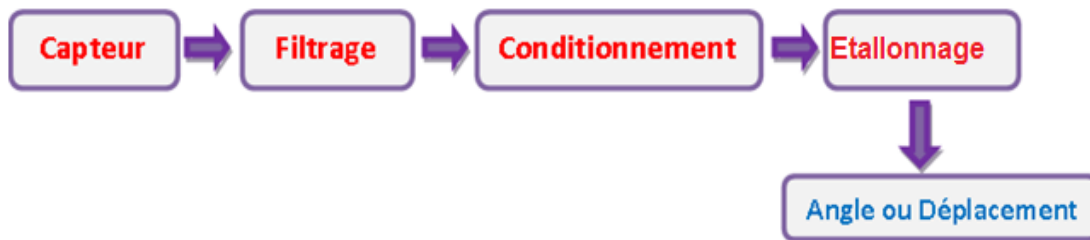


Figure III.8. Schéma de principe d'obtention de position

L'information (tension) est retournée par un circuit électronique « diviseur de tension », cette dernière est injectée dans le bloc de filtrage pour éliminer les bruits et les parasites des fils, afin qu'elle soit conditionnée et étalonnée selon notre structure mécanique pour obtenir l'angle de rotation et les valeurs de déplacements. La figure ci-dessus résume le principe de détermination de la position à travers le capteur (Figure III.8).

III.6.2 Incorporation des capteurs dans la structure

Pour la mesure des déplacements nous avons couplé les capteurs avec des courroies dentées verticales et horizontales qui permettent d'entraîner le pignon de capteurs tout au long du déplacement de la vis sans fin (Figure III.9).

Remarque: on ne peut pas engrener le pignon du capteur directement à l'arbre du vis sans fin car le déplacement demande un nombre de tours important d'où le multitour risque de ne pas suffir.

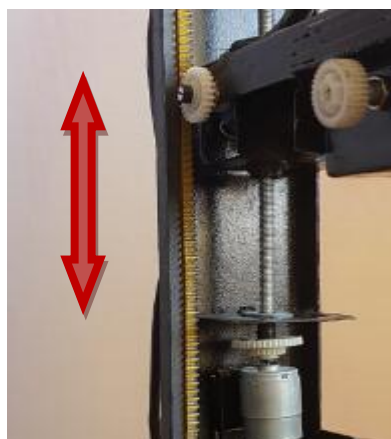


Figure III.9. Incorporation de capteur (ART2)

III.7 Actionneurs

III.7.1 Présentation du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique, il est constitué essentiellement de deux parties :

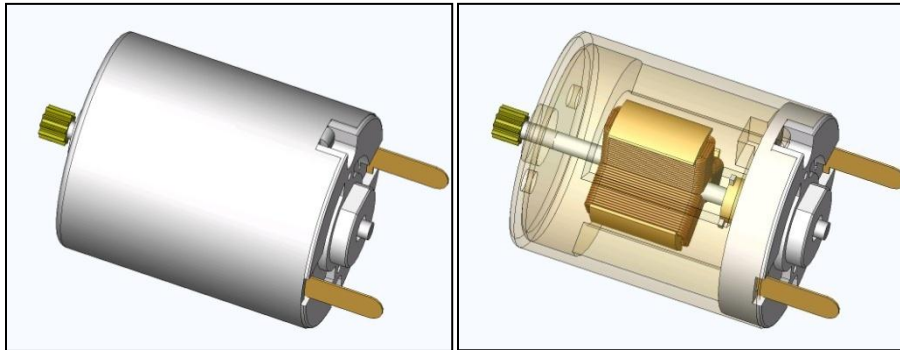


Figure III.10. Moteur à courant continu

Le stator : c'est la partie fixe du moteur, elle comporte les aimants permanents qui créent un champ magnétique fixe, le stator représente le circuit inducteur (Figure III.11).

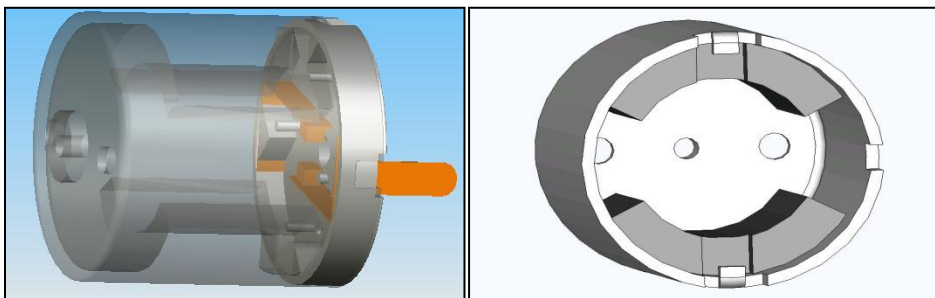


Figure III.11. Le stator

Le rotor : c'est la partie tournante du moteur, elle supporte le circuit électrique constitué de bobines reliées entre elles au niveau du collecteur, le rotor représente le circuit induit.

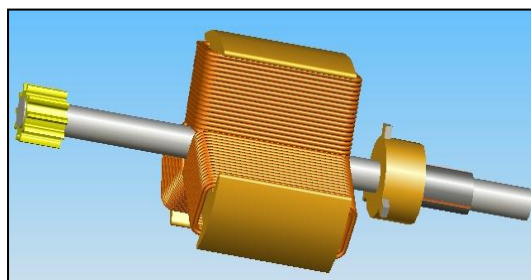


Figure III.12. Le rotor

Lorsque les bobines d'induit sont alimentées via les balais et le collecteur par un courant I , sous l'effet de champ \vec{B} elles subissent une force \vec{F} dite de Laplace qui entraîne la rotation de l'arbre du moteur.

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l}\vec{B} \quad (III.4)$$

Chaque paire de pôles subit deux forces (\vec{F}_1, \vec{F}_2) qui constituent le couple moteur C_m (Figure III.11).

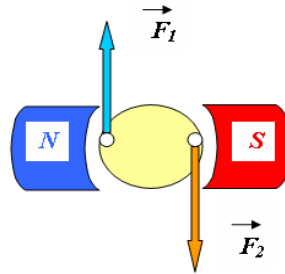


Figure III.13 : couple de force

$$C_m = K_e \cdot I \quad (III.5)$$

K_e est une constante qui dépend de la structure interne du moteur

Le courant dans les bobines génère une force contre électromotrice E dont l'expression est :

$$E = K_e \cdot \Omega \quad (III.6)$$

Le moteur peut être représenté par le schéma électrique ci-contre d'où on peut tirer sa troisième équation électrique:

$$U(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} + e(t) \quad (III.7)$$

Qui s'exprime en continu par : $U = R \cdot I + E$

La modélisation du moteur doit prendre en considération la partie mécanique, d'où est issu sa loi dynamique de fonctionnement qui s'exprime :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \quad (III.8)$$

C_m et C_r représentent respectivement le couple moteur et le couple résistant. Tous ces paramètres des moteurs sont fournis par le fabricant.

III.7.2 Incorporation des Moteurs

Pour l'incorporation des moteurs dans la structure, nous avons fixé avec des vis pour les articulations rotoïde afin d'éviter les vibrations mécaniques qui provoquent l'instabilité de robot.

Les moteurs qui réalisent le mouvement prismatique nous les avons fixé avec une colle Araldite et couplé avec des vis sans fin (les figures III.14 et III.15).



Figure III.14 : Moteur pour ART 2

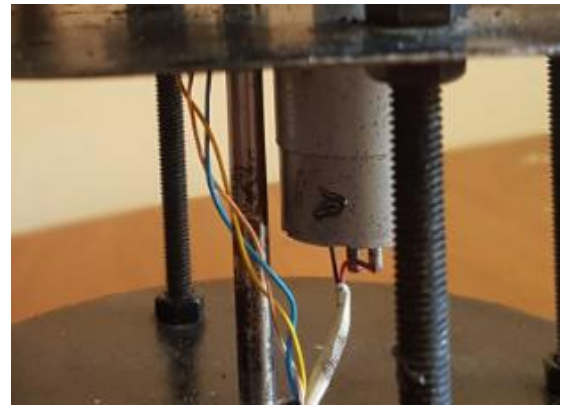


Figure III.15 : Moteur pour ART 1

III.8 Assemblage du bras articulé

Après la réalisation des différentes pièces du bras articulé, on est passé à l'assemblage finale et l'incorporation de ces composants (les moteurs et les capteurs), nous les avons câblés avec les cartes en utilisant des câbles avec des gaines flexibles.

La figure qui suit illustre l'assemblage final du bras articulé. (Figure III.16)

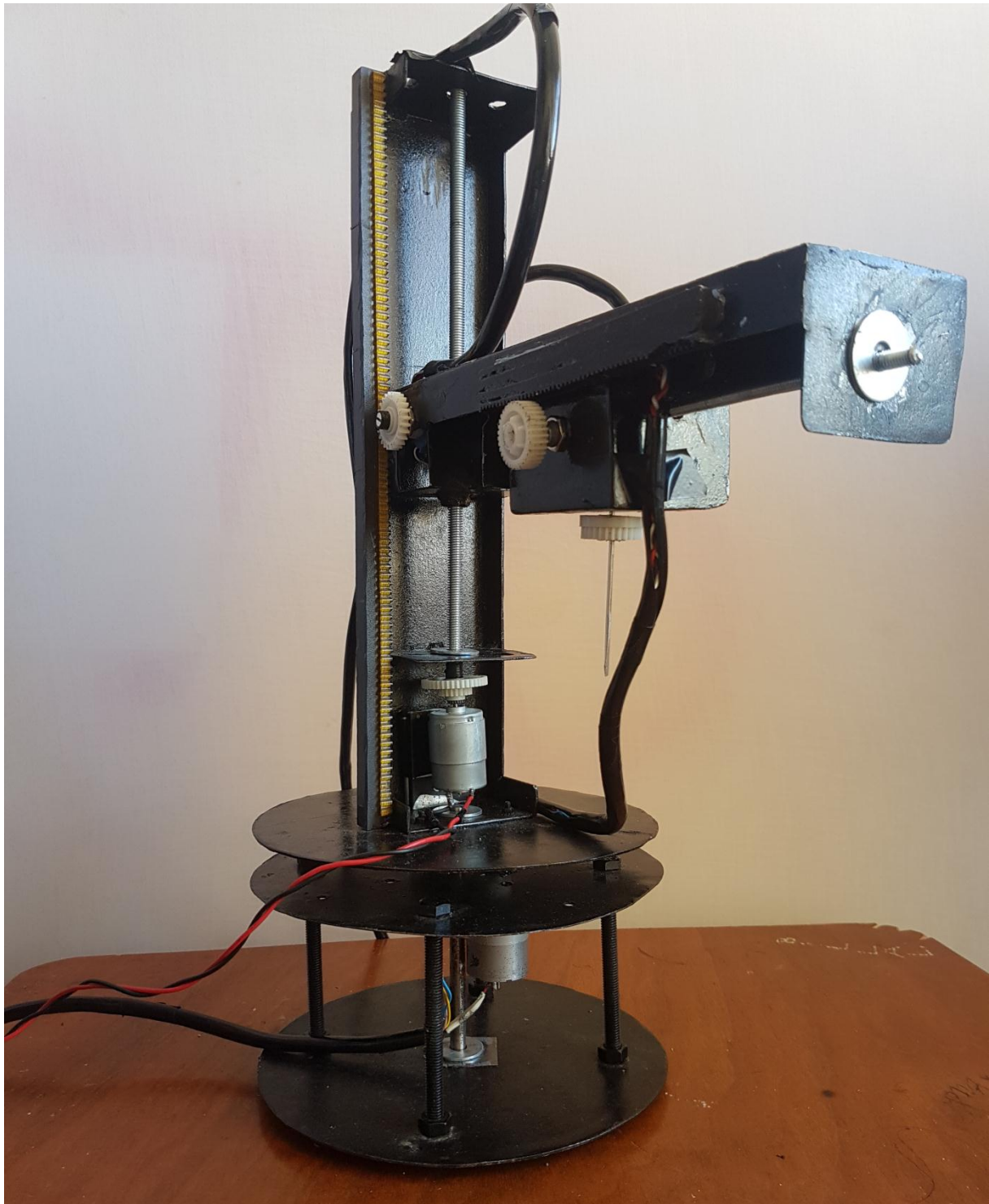


Figure III.16 : La structure mécanique finale du bras articulé RPPR

III.9 Caractéristique du bras articulé

Le bras articulé à quatre degrés de liberté ainsi réalisé et équipé de moteurs à courant continu et de capteurs de position, les caractéristiques du bras sont décrites dans le Tableau III.2.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU BRAS ARTICULE			
Propriétés	Bras articulé à 4 degrés de libertés (4 d.d.l) RPPR		
Actionneurs		Tension nominal	24 v
		Courant nominal	2 A
		Résistance de bobine	2.1 Ohm
		Inductance	35 mH
		Couple moteur	1350 g/cm
	MCC Buhler 1.13.055.xxx	Vitesse de rotation	3100 tour/min
Capteurs de position		Potentiométriques	5 kΩ
			Multitour 10 tours
			Puissance Max = 2 W à 70°
Articulations	Articulation 1 (base)	Intervalle de rotation 180° → $[0, (\frac{\pi}{2})]$	
	Articulation 2 (vertical)	Intervalle de translation 50 → 275 mm	
	Articulation 3 (horizontal)	Intervalle de translation 70 → 170 mm	
	Articulation 4	Intervalle de rotation 360° → $[0, 2\pi]$	
Espace de travail	Cylindrique	Rayon = 450 mm	

Tableau III.2 : Caractéristiques techniques du bras articulé

III.10 Partie électrique et étage de commande

L'étage de commande a pour rôle d'assurer la communication bidirectionnelle entre le PC et le bras via une interface d'entrées/sorties à base d'Arduino, pour récupérer les informations des capteurs et transmettre des signaux de commandes afin d'accomplir le rôle de pilotage des moteurs,

III.10.1 Phase de conception

La Figure III.17 illustre un schéma synoptique du fonctionnement général de l'étage de commande:

Le principe de cette commande est basé essentiellement sur :

- l'interface graphique du pc :
 - Qui va donner l'ordre de déplacement du bras manipulateur en sélectionnant une configuration désirée.
 - recevoir les données numérisées des capteurs analogiques qui serviront à un retour d'information pour l'asservissement de position en boucle fermée.
 - Traduire l'état du robot réel par un robot virtuel en temps réel en utilisant les données capteurs.
- Le microcontrôleur :
 - qui va faire l'acquisition des données capteurs et les convertir grâce à son ADC.
 - recevoir du pc la commande pour chaque articulation du bras.
 - Traduire cette commande en signaux numériques pour actionner les moteurs.

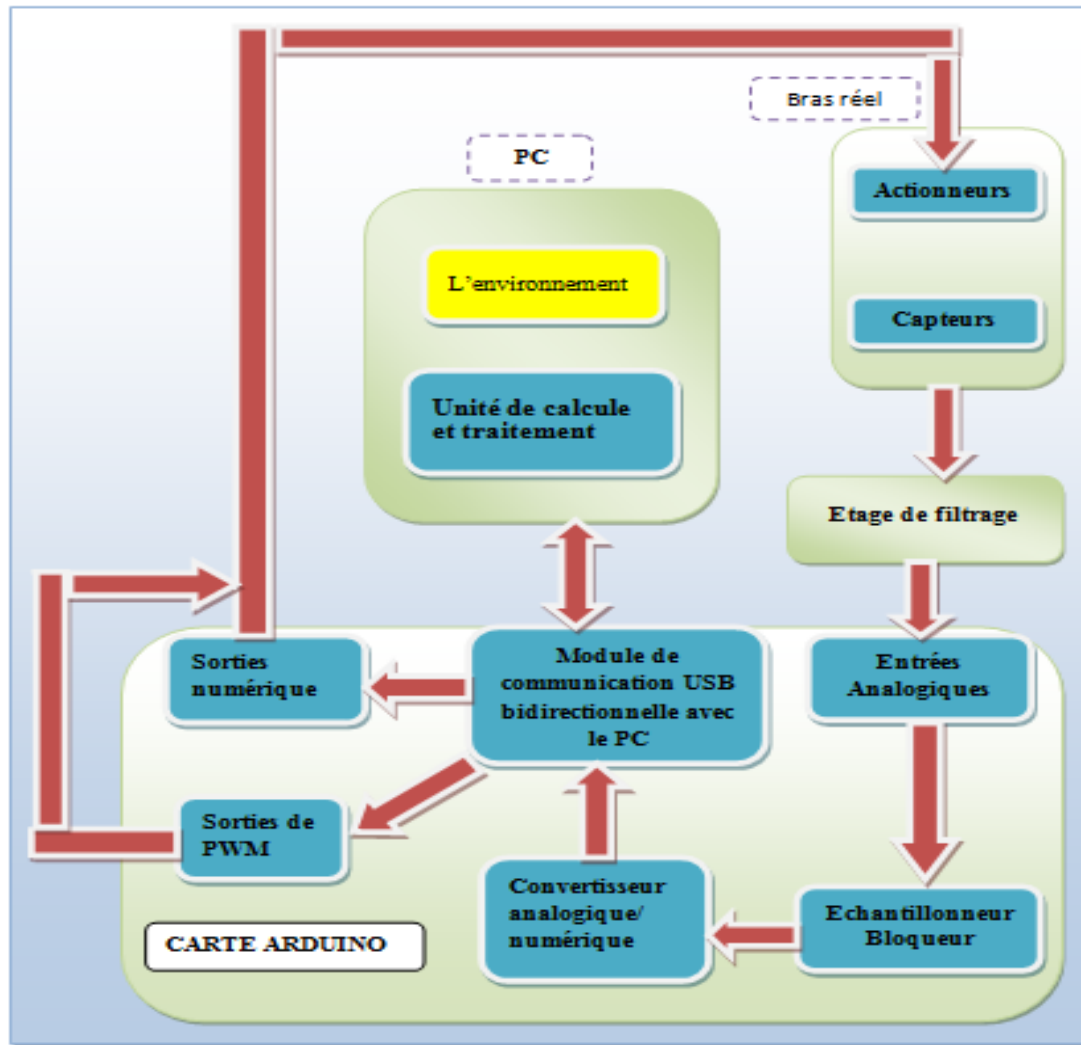


Figure III.17 : Schéma synoptique de l'étage de commande

III.10.2 Environnement de la programmation

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 la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information. Ce programme appelé IDE ARDUINO [7].

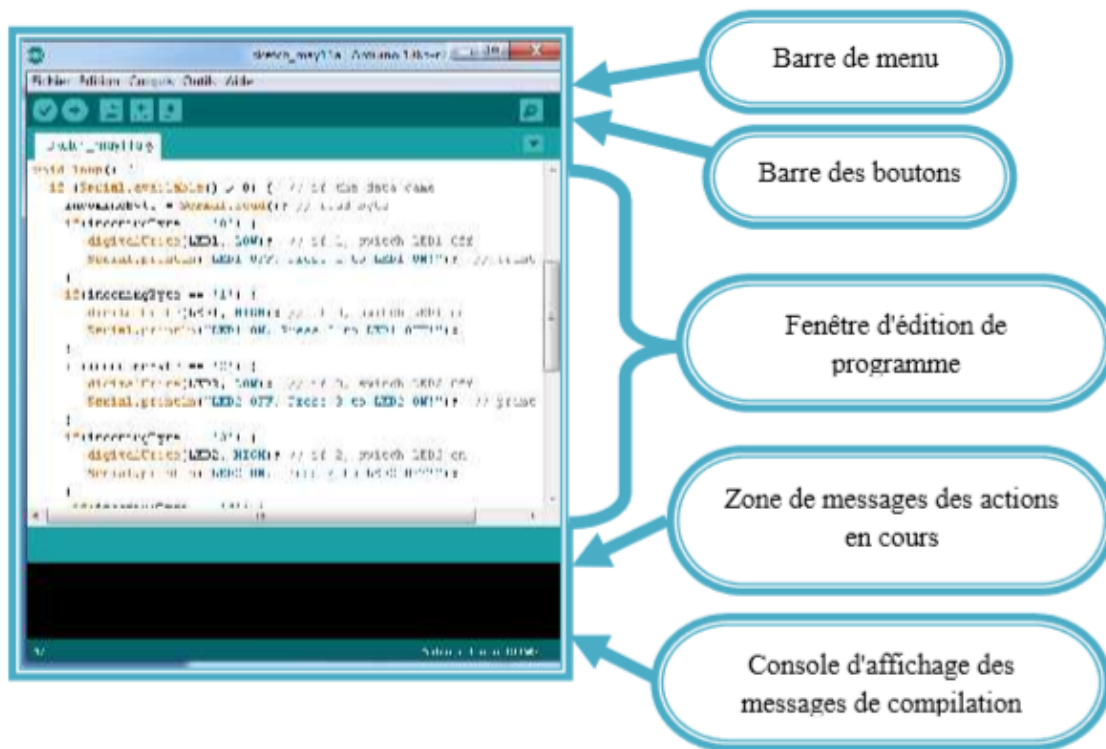


Figure III.18: Schéma Interface IDE ARDUINO.

III.10.3 Réalisation du circuit électronique de l'étage de commande

La figure III.19 présente le schéma de l'étage de commande constitué d'un CPU puissant (Arduino), entouré d'étages d'entrées/sorties, étage de filtrage.

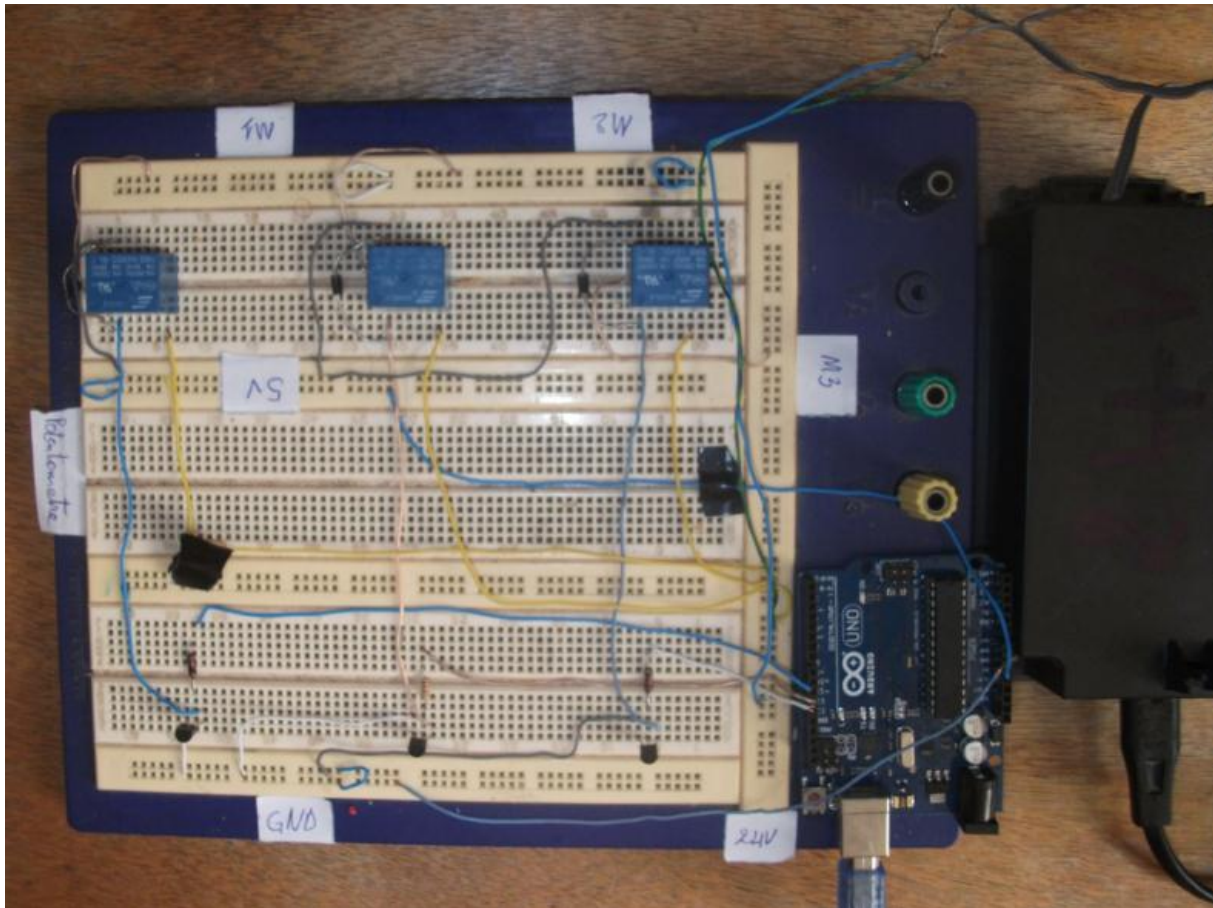


Figure III.19. Schéma électrique de l'étage de commande

III.11 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de faire une présentation de la partie mécanique de notre robot, avec l'exposition de différentes étapes de sa conception et sa réalisation.

On a présenté dans ce chapitre les étapes suivies dans la partie électronique pour réaliser la carte de commande qui communique avec le PC, ensuite on a ajouté une alimentation qui fournit l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de système.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

A travers le travail accompli et les efforts consentis tout au long de la réalisation de ce projet, nous avons la certitude d'avoir, enrichi nos connaissances et d'une expérience que nous souhaitons utile et profitable dans le domaine de robotique. Nous sommes parvenus à nous faire une idée plus rapprochée et plus claire sur la portée et l'envergure que peut prendre un tel système dans les années à venir.

Le développement de notre projet nous a beaucoup enrichi, dans ce qui concerne les aspects électroniques et mécaniques plus précisément dans le domaine des bras manipulateurs, la communication USB et la programmation en temps réel.

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objectif l'étude, la conception et la réalisation d'un bras manipulateur à quatre degrés de liberté.

Nous avons privilégié, dans notre mémoire, l'étude des différentes approches de modélisation mathématique du robot manipulateur où il était question de décrire la modélisation géométrique, dans le but de repérer, avec précision, le « bras » par rapport à son environnement réel.

Dans la continuité de notre travail on pourra :

- Minimiser la structure mécanique pour qu'elle soit portable.
- Ajouter la détection de collision et le retour d'effort.
- Améliorer les performances du robot.
- Améliorer les indices de performances en utilisant un régulateur plus performant.
- Améliorer le sens de la téléopération en installant un protocole TCP/IP.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T.ALANI « Introduction à la robotique -Partie 1: Définitions et terminologies » thèse de Master, Laboratoire ESIEE-Paris, 2009.
- [2] A. DAOUDI, « Conception et réalisation d'un outil d'aide à la modélisation en Robotique », Thèse de Magister, USTHB, 1994.
- [3] P. COIFET, et A. KHEDDAR, « Télé-opération et télé-robotique », Traité IC2, série Systèmes automatisés, Hermès, 2002.
- [4] S. Otmane, « Téléopération, télérobotique et Internet : Techniques & applications », Université d'Evry Val d'Essonne / UFR S&T, Laboratoire IBISC (Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes).
- [5] Mme S.BORSALI, « modélisation des robots », master automatique S2, université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, Faculte des Sciences de l'Ingenieur, 2012.
- [6] A. Daoudi, cour Mécanique pour la robotique arm32, USTHB. 2012.
- [7] M. MAHDJOUR « la realite virtuelle pour une conception des systèmes mécaniques centrée sur l'utilisateur » THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR. Université de Technologie de Belfort Montbéliard, 2007.

Web bibliographie

- [Web 01] <https://pedagogie.ec-nantes.fr>

Résumé :

La robotique fait actuellement l'objet de très nombreux développements, étendant leurs domaines d'utilisation. Pour cela, elles doivent permettre de manipuler à titre d'exemple un bras manipulateur polyarticulé distant ou virtuel de manière aussi naturelle et intuitive que possible de telle sorte que l'utilisateur puisse avoir des informations réelles dans un univers virtuel. Cela requiert le respect de certains critères qui seront présentés dans ce projet de fin d'étude. Nous reviendrons ensuite sur les outils à la disposition du concepteur pour dimensionner et optimiser ce type d'interface afin de répondre à ces critères.

Mots clefs : Robotique, ARDUINO, 3D (solidworks), bras manipulateur, commande.

Abstract:

The robotic is currently the subject of many developments, extending their areas of use. For this, they are capable of handling as an example a manipulator arm polyarticulated remote or virtual manner as natural and intuitive as possible so that the user can have real information in a virtual world. This requires compliance with certainly criteria that will be presented in this final project study. Then back on the tools available to the designer to size and optimize this type of interface to meet these criteria.

Keywords: ARDUINO, robotic, slavery, 3D (solidworks), manipulator arm, control.