

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE**
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par :

Lylia BELAIDI

Mémoire dirigé par : Mr MELLAH Rabah

Thème

**Conception et réalisation d'un bras
manipulateur à trois degrés de liberté**

Mémoire soutenu publiquement le 29/09/ 2015 Devant les jurys composé de :

M. Said GUERMAH

MCA, Dpt d'automatique, Président

M. Rabah MELLAH

MCA, Dpt d'automatique, Promoteur

M. Hakim ACHOUR

MCB, Dpt d'automatique, Examineur

M. Ouiza BOUKENDOUR

MAB, Dpt d'automatique, Examineur

M Smail DJIOUA , co-promoteur

Le travail a été réalisé au sein du laboratoire DZ de TIZI OUZOU.

Remerciements

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Recherches ETS SAHI _DZLABO TIZI OUZOU

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur
Monsieur MELLAH Rabah, Professeur à l'UMMTO,
qui a accepté de m'encadrer et guider mes travaux jusqu'à la réalisation de ce
mémoire. Qu'il trouve ici, le témoignage de ma profonde gratitude et ma
reconnaissance pour les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer et pour la confiance
. qu'il m'a accordé

Je remercie très vivement Monsieur DJIOUA Smail de m'avoir offert
l'opportunité d'effectuer un stage au sein de son laboratoire, et d'avoir mis à ma disposition
tout le nécessaire pour l'élaboration de mon projet.

Je remercie également les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner
mon travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes chers parents pour leur encouragement,
leur patience, et leur grand soutien durant toutes ces années d'études.

C'est avec un énorme plaisir que je formule ma gratitude et mes remerciements à ma tante
HAKEM Yasmina, pour l'aide précieuse qu'elle m'a apporté.

Et finalement, je remercie tous mes amis, particulièrement les étudiants
du département de Génie Electrique de l'UMMTO ainsi que toutes les personnes qui ont
contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

Dédicaces

C'est avec une grande émotion que je dédie ce modeste travail de fin d'études aux êtres les plus chères à mon cœur.

A mon père et ma mère, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et qui ont veillé de guider mes pas durant toute ma vie par leurs aides, leurs grandes émotions et leur sacrifice.

A mes chers sœurs : Samia, Rezika et Inès pour l'amour, la tendresse et la compréhension que j'ai eu de leurs part.

A ma chère grande mère et à la mémoire de mon grand père, à toutes mes tantes, à mon oncle et à tous mes cousins et cousines.

A tous mes amis.

Table des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Structure fonctionnelle d'un robot.....	5
Figure I.2 : Représentation d'un bras manipulateur.....	8
Figure I.3: Des articulations prismatiques et rotoïdes.....	10
Figure I.4: Différent type de mécanismes.....	10
Figure I.5: Exemple de Configuration cartésienne (PPP).....	11
Figure I.6: Exemple de Configuration cylindrique (RPP).....	11
Figure I.7: Exemple de Configuration sphérique (RRP).....	12
Figure I.8 : Exemple de Configuration articulée (RRR).....	13
Figure I.9 : Exemple de Configuration SCARA.....	13
Figure I.10 : Différentes structures du porteur.....	14

Chapitre II :

Figure II.1 : Coordonnées cartésiennes d'un point M.....	17
Figure II.2 : Coordonnées polaires d'un point M.....	18
Figure II.3 : Coordonnées cylindriques d'un point M.....	18
Figure II.4 : Coordonnées sphériques d'un point M.....	19
Figure II.5 : Représentation graphique des vecteurs.....	19
Figure II.6: produit vectoriel de deux vecteurs.....	20
Figure II.7 : Passage d'un repère R_i à un repère R_f	21
Figure II.8 : Translation pure d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	22
Figure II.9 : Rotation pure autour de l'axe « x » d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	24
Figure II.10: Rotation pure autour de l'axe « y » d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	24
Figure II.10 : Rotation pure autour de l'axe « z » d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	25
Figure II.12 : Passage direct et inverse d'un repère R_i à un repère R_j	26
Figure II.13 : Composition à droite et à gauche d'une transformation.....	27

Table des figures

Figure II.14 : Les angles d'Euler (convention z, x, z)	30
Figure II.15 : Les angles de Bryant (convention x, y, z).....	30
Figure II.16 : Robot à structure ouverte simple	32
Figure II.17 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure en chaîne simple	33
Figure II.18 : Schéma de la représentation géométrique et placement des repères du manipulateur	34
Figure II.19 : Géométrie des deux derniers segments.....	37
Figure II.20 : Application du théorème de Pythagore sur un triangle.....	38
Figure II.21 : Application du théorème de Pythagore sur notre configuration géométrique	38

Chapitre III :

Figure III.1 : Schéma bloc du système.....	41
Figure III.2 : La structure mécanique articulée du manipulateur	42
Figure III.3 : Structure mécanique	44
Figure III.4 : La structure mécanique articulée du manipulateur au repos	44
Figure III.5: Les différents composants d'un servomoteur	46
Figure III.6: Présentation d'un servomoteur	47
Figure III.7 : Fonctionnement du potentiomètre.....	48
Figure III.8 : Les dimensions du servomoteur Hitec-5765MH	49
Figure III.9 : Signal PWM.....	50
Figure III.10 : Relation PWM et angle résultant	51
Figure III.11 : Prestation de la carte Arduino Uno	54
Figure III.12 : Logiciel Arduino	55
Figure III.13 : Barre des boutons du logiciel Arduino	56
Figure III.14 : Principe d'alimentation d'un servomoteur	58
Figure III.15 : Principe d'alimentation du manipulateur	59

Table des figures

Chapitre IV :

Figure IV.1 : L'espace de développement Arduino	60
Figure IV.2 : Exemple de connexion d'un servomoteur sur un Arduino	61
Figure IV.3 : Enficher l'EasyCard sur la carte Arduino	61
Figure IV.4: Le schéma théorique	62
Figure IV.5 : Le montage final	62
Figure IV.6: Structure du programme.....	64
Figure IV.7 : La fenêtre du terminal série.....	65

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I: Introduction à la robotique

I.1	Introduction	1
I.2	Définitions	1
I.3	Différentes catégories de robots	1
I.3.1	Robots mobiles	3
I.3.2	Robots humanoïdes	3
I.3.3	Robots manipulateurs	3
I.4	Usages et domaines d'application des robots	4
I.5	Le bras manipulateur dans son contexte	5
I.6	Classification des manipulateurs	6
I.7	Caractéristiques d'un manipulateur	7
I.8	Structure mécanique d'un robot manipulateur et son Vocabulaires	7
I.9	Notions géométriques d'un manipulateur	9
I.9.1	Solides	9
I.9.2	Notion de degré de liberté	9
I.9.3	Liaison	9
I.9.4	Les articulations	9
I.9.5	Mécanismes	10
I.9.6	Morphologie des porteurs	11
I.10	Actionnement d'un manipulateur	14
I.11	Les capteurs d'un manipulateur	15
I.12	Conclusion	16

Chapitre II: modélisation Géométrique

II.1	Introduction	17
II.2	Rappels	17
II.1. 1	Repère	17
II.1. 2	Coordonnées	17
II.1. 3	Rappel sur les vecteurs	19
II.1. 4	Méthode Cramer	20
II.1. 5	Transformations rigides	21
II.3	Transformations homogènes	21
II.3.1	Matrice de transformations homogènes de translation pure	22
II.3.2	Matrice de transformation homogène de rotation pure	23
II.3.3	Propriétés des matrices de transformation homogène	26
II.4	Situation d'un solide dans l'espace	28
II.4.1	Description de la position d'un solide	28
II.4.2	Description de l'orientation d'un solide	29
II.5	Introduction à la modélisation	31
II.6	Description de la structure géométrique d'un robot	31
II.6.1	Notations et règles générales	31
II.6.2	Description des robots à chaîne ouverte simple	32
II.6.3	Paramétrage de Denavit-Hartenberg	32
II.7	Calcul du modèle géométrique du manipulateur à concevoir	34
II.7.1	Modèle géométrique direct	35
II.7.2	Modèle géométrique inverse	36

Sommaire

II.8 Conclusion.....	40
----------------------	----

Chapitre III: Conception

III.1 Introduction.....	41
III.2 Mise en œuvre.....	41
III.3 Description de la structure mécanique articulée	42
III.4 Etude mécanique du manipulateur	42
III.4.1 Matériaux utilisés.....	42
III.4.2 Poids de la charge à soulever.....	43
III.4.3 Poids de la pince	43
III.4.4 Poids des moteurs	43
III.4.5 Poids et longueurs des segments du bras	43
III.4.6 Calcul des couples nécessaires	44
III.5 Actionnement du manipulateur	46
III.5.1 Choix des actionneurs	46
III.5.2 Présentation et caractéristiques générales d'un servomoteur	46
III.5.3 Fonctionnement	47
III.5.4 Le rôle de l'électronique et du potentiomètre	47
III.5.5 Rôle du système réducteur	48
III.5.6 Les servomoteurs utilisés	48
III.6 La PWM.....	50
III.6.1 Définition.....	50
III.6.2 Intérêt de PWM pour les moteurs.....	50
III.6.3 Commande des servomoteurs en PWM	51
III.7 Carte de commande	52
III.7.1 Arduino	52
III.7.2 Pourquoi Arduino	52
III.7.3 Le principe de fonctionnement d'Arduino	53
III.7.4 La carte Arduino Uno	53
III.7.4.1 Présentation du matériel	53
III.7.4.2 Présentation du logiciel.....	55
III.7.5 Programmation sur Arduino	56
III.7.6 Arduino et la PWM et les servomoteurs	57
III.8 Gestion de l'alimentation de la carte Arduino et des servomoteurs.....	57
III.8.1 Principe d'alimentation d'un servomoteur Hitec-HS-576.....	58
III.8.2 Principe d'alimentation d'une carte Arduino Uno.....	59
III.9 Conclusion	59

Chapitre IV: Application

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Les détails du montage	60
IV.3 Partie programmation	63
IV.4 Organigramme	67

Conclusion générale.....	
Référence bibliographiques	

Introduction générale

La robotique est un regroupement de disciplines et de techniques réunies autour d'un objet commun qui a toujours fait rêver l'homme. Cet objet qui ne cesse de réjouir l'humanité et de passionner les chercheurs s'appelle « robot ».

C'est au siècle dernier que le « boom » de la robotique a amorcé l'explosion des thèmes de recherche. A cette époque les robots existant étaient conçus pour le milieu industriel en respectant certaines contraintes, comme la répétabilité, la précision dans la réalisation des tâches, le respect des cadences de production, etc. Prenons l'exemple des bras manipulateurs industriels des années 80 très semblables aux bras industriels actuels, ils se déplacent à très grandes vitesses sur des trajectoires calculées hors ligne dans des environnements protégés et structurés, sans interaction avec les opérateurs humains.

C'est avec les développements scientifiques, spécifiquement de l'électronique et de l'informatique mais aussi automatique, mathématique, mécanique, matériaux, que la technologie robotique a progressé. Les robots actuels sont dotés d'une « intelligence » qui leur donne une certaine autonomie qui va leur permettre de se diffuser dans divers domaines. Nous parlons maintenant de robots mobiles, de robots d'exploration, de robots d'intervention, de robots ludiques, de robots de service, etc.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux robots manipulateurs. Historiquement ces derniers sont les premiers à avoir vu jour, ils ce sont longtemps affichés comme un mécanisme articulé de grande taille, fixé sur une base rigide, assurant des taches précises données par son constructeur, le but de leurs utilisation était d'affranchir l'être humain de tâches lassantes et monotones. Mais aujourd'hui le robot manipulateur ne sera plus un outil qui effectue une tâche répétitive dans un espace sécurisé, mais un partenaire des activités quotidiennes.

Un bras manipulateur, est un robot généralement programmable, pouvant réagir et faire des fonctions similaires à celles du bras humain, il peut être autonome ou dépendant d'un contrôle manuel, il est soit fixé sur une base rigide stable ou mobile, tout dépend de l'environnement et l'application pour lequel il a été conçu.

La mise en œuvre d'un bras manipulateur n'est pas une chose facile, ce travail nécessite beaucoup de connaissance dans divers domaine, dans notre projet, on s'est chargé de concevoir et de réaliser un robot manipulateur a trois degrés de libertés.

Notre travail, est subdivise en quatre parties comme suit :

Dans le premier chapitre, nous allons définir certaines notions fondamentales liées à la robotique en général, ensuite allons nous consacrés à la définition de notions relatives aux robots manipulateurs pour une meilleure compréhension de ce type de mécanismes.

Puis dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéressé à la modélisation géométrique de manipulateur concéder, trouver le modèle géométrique direct ainsi que le modèle géométrique inverse, donner la structure géométrique que nous allons réaliser.

Introduction générale

Ensuite dans le troisième chapitre, nous allons présenter les différents composants indispensables à la réalisation de notre bras manipulateur, détailler le fonctionnement de chaque composant utilisé, et faire le schéma fonctionnel du système.

Par la suite, dans le quatrième chapitre, nous ferons part de notre réalisation, voir l'organigramme de notre système.

I.1 Introduction :

Imaginée en premier par la science-fiction avant de donner lieu à des vastes recherches scientifiques et technologiques, l'origine du mot robot vient du tchèque "robota", qui signifie le travail d'un serf ou d'un asservi, naquit dans une pièce de théâtre, écrite en 1920 et jouée pour la première fois en 1921, due à l'écrivain tchèque Karel Capek, ou il désignait de petits êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maître, le titre en était R.U.R., les initiales de « Robots Universels de Rossum ». Le terme de « robotique », quand a lui fit sa première apparition en 1941 dans la nouvelle Liar d'Isaac Asimov.[1]

C'est précisément dans les années 1940, que l'évolution de la robotique a été bouleversée avec l'arrivée de l'électronique puis de l'ordinateur. En effet Dès 1936, le principe de « machine à penser » énoncé par Alan M. Turing, a suscité de nombreuses recherches, et c'est en 1956 que le premier programme informatique a été mis en place par Herbert Simon, marquant ainsi les débuts de l'intelligence artificielle. L'usage de l'intelligence artificielle s'est démocratisé peu à peu et le premier secteur à en avoir bénéficié est l'industrie. Énergétique tout d'abord, avec le bras téléopéré du français Georges Goertz ; puis automobile, lorsqu'en 1962, la General Motors acquiert le premier robot industriel de l'histoire. « L'Unimate 001 » (abréviation d'Universal Automation) marque ainsi la naissance des robots de 1^{ère} génération.

Les robots industriels se perfectionnent et gagnent en fiabilité ; en revanche, quelles que soient leurs performances, ça reste des machines mono-tâche énormes, lourds, qui ne s'adaptent pas à leur environnement. C'est justement sur ce point que les recherches vont s'effectuer, et grâce à la percée des capteurs, l'homme commence à fabriquer des robots capable de réagir face à une situation donnée, d'où leur appellation « robots de 2^{ème} génération ». Néanmoins, ces robots restent peu fonctionnels puisqu'il leur faut environ une heure de calcul avant d'effectuer un mouvement.

Ce n'est qu'au milieu des années 1970 avec l'apparition des micro-ordinateurs et des micro-processeurs, que les robots vont pouvoir gravir un échelon supplémentaire de l'intelligence artificielle. Les robots embarquent désormais des composants de taille raisonnable sur lesquels tournent des logiciels de plus en plus perfectionnés. Les machines à penser savent enfin développer des comportements face à des situations. Plus qu'agir, leurs caméras, capteurs, logiciels et actionneurs leur permettent d'interagir par eux-mêmes ; voir, pour les plus avancés d'entre eux, de modifier leur propre programme.

C'est dans cette catégorie que les robots actuels se situent, de plus en plus intelligents et autonomes, ils savent écouter et/ou parler, et se dotent parfois d'une véritable personnalité. Ils se diffusent dans tous les domaines et il devient difficile de citer un secteur d'activité qui ne fait pas appel à eux. Leurs performances (contrôle, comportement, précision, autonomie) s'améliorent avec l'avancée en parallèle des nouvelles technologies. Ils nous étonnent et nous interpellent autant qu'ils nous fascinent. Mais surtout ils nous interrogent sur notre futur.

I.2 Définitions :

Plusieurs définitions ont été apportées au mot robot depuis son apparition et parmi elles, nous avons retenu :

- "Un appareil automatique qui peut effectuer des fonctions semblables à celles des humains." Traduit du dictionnaire Webster's
- "Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable." Petit Larousse
- "Un manipulateur reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des outils, des pièces ou des composants spécialisés à travers une série de mouvements programmés pour effectuer une tâche précise." Robot Institut de robotique d'Amérique, 1979
- "machine automatique (à l'aspect humain) doté d'une mémoire et d'un programme, capable de se substituer à l'homme pour effectuer certains travaux." Hachette
- « un système capable d'accomplir des tâches, en tout ou en partie, habituellement dévouées aux humains » JIRA (Association Japonaise de Robotique Industrielle).

I.3 Différentes catégories de robots :

A l'heure actuelle, on distingue trois catégories de robots qui sont réparties comme suit :

I.3.1 Robots mobiles: Cette catégorie englobe tous les robots capables de se déplacer dans un environnement, et on peut distinguer quatre types de locomotion : les robots marcheurs qui imitent la démarche humaine, les robots roulants mobiles qui ressemblent de plus à des véhicules, les robots aériens et les robots sous marins. Cette catégorie désigne d'une façon générale la sous catégorie des robots mobiles roulants, appelés rovers généralement utilisés pour faire de l'exploration. Un parfait exemple de rover est le Curiosity qui a été envoyé sur Mars par la NASA.

I.3.2 Robots humanoïdes: Catégorie la plus connue, en grande partie grâce à leur promotion faite par la science fiction, elle regroupe tous les robots anthropomorphes, ceux dont la forme rappelle la morphologie humaine. Ces robots ont généralement une tête, un torse, deux bras et deux jambes et parmi, on peut citer le robot Asimo ; bien que certains modèles ne représentent qu'une partie du corps.

Lorsqu'un robot humanoïde imite non seulement l'apparence physique, mais aussi le comportement humain, on l'appelle un androïde.

I.3.3 Robots manipulateurs : Cette catégorie représente la majorité des robots en service actuellement. Ce sont des robots ancrés physiquement à leurs places de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise ou répétitive. Ils sont plus utilisés dans le domaine industriel pour différentes manipulations tels que le soudage, peinture, charge lourde etc...

I.4 Usages et domaines d'application des robots :

La robotique est un domaine en plein essor depuis quelques années, elle est utilisée dans des domaines extrêmement rigoureux et exigeants. Nous allons explorer ces différents domaines :

1. Le domaine industriel: Depuis leur apparition sur les chaînes de production dans les années 1970, les robots industriels ont pris une place de plus en plus importante dans la plupart des secteurs industriels. En effet, ils remplacent souvent l'homme dans des tâches bien précises et répétitives mais surtout dans des endroits et des conditions qui seraient dangereuses pour lui. Aujourd'hui, ils jouent un rôle prépondérant pour :

- les manipulations de produits à haute cadence,
- les opérations de packaging et d'emballage
- l'assemblage de produits (secteur automobile, pharmaceutique, cosmétique, etc...),
- les opérations de fin de ligne (palettisation).

2. Le domaine militaire : Les robots sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire et ont plusieurs fonctions tout à fait différentes les unes des autres, telles que : La surveillance, l'aide aux soldats (Le BigDog), la reconnaissance, le combat, l'espionnage (Le SnakeBot), etc...

3. Le domaine médical: Aujourd'hui, il existe deux types de robots dans le domaine médical :

- Les robots d'aide au diagnostic sont très récents puisqu'ils ont existé depuis seulement 30 ans. Ils sont principalement basés sur de l'imagerie (scanner, IRM, échographie, endoscopie), ce qui permet aux chirurgiens d'obtenir rapidement des informations sur les pathologies.
- Les robots chirurgiens sont des outils chirurgicaux qui aident les médecins pendant les opérations chirurgicales, telle que Neuromate. Parmi ces robots, on cite Robodoc et Da Vinci S soldats qui sont les deux premiers robots chirurgiens qui ont existé.

4. Le domaine d'exploration : L'utilisation des robots explorateurs est parfois la seule solution existante pour accéder à certains environnements ou l'homme se trouve dans l'incapacité de réaliser, comme par exemple:

- Exploration d'autres planètes comme Mars (les robots Spirit et Opportunity)
- Exploration d'épaves ou de décombres.
- Exploration de zones radioactives (les robots Super Girafe et Frigoma de Fukushima)

5. Le domaine des services : La robotique de service est définie comme la partie de la robotique qui assiste l'homme dans ses activités professionnelles comme dans sa vie courante, contribuant à améliorer ses conditions de travail, sa sécurité, son bien-être, etc... Selon les typologies utilisées, on distingue la robotique de service professionnelle, la robotique de service domestique et la robotique personnelle.

I.5 Le bras manipulateur dans son contexte :

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables en vue l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel. [2]

Cependant, on retrouve toujours autour de ce dernier, trois composantes essentielles : [3]

- La source d'énergie: elle peut être électrique, hydraulique ou pneumatique;
- La source d'information: elle définit les tâches à accomplir et traite toutes les informations relatives aux commandes et aux mesures;
- L'environnement: il comprend à la fois l'espace atteignable du robot, les obstacles, les objets à manipuler et les propriétés physiques du milieu.

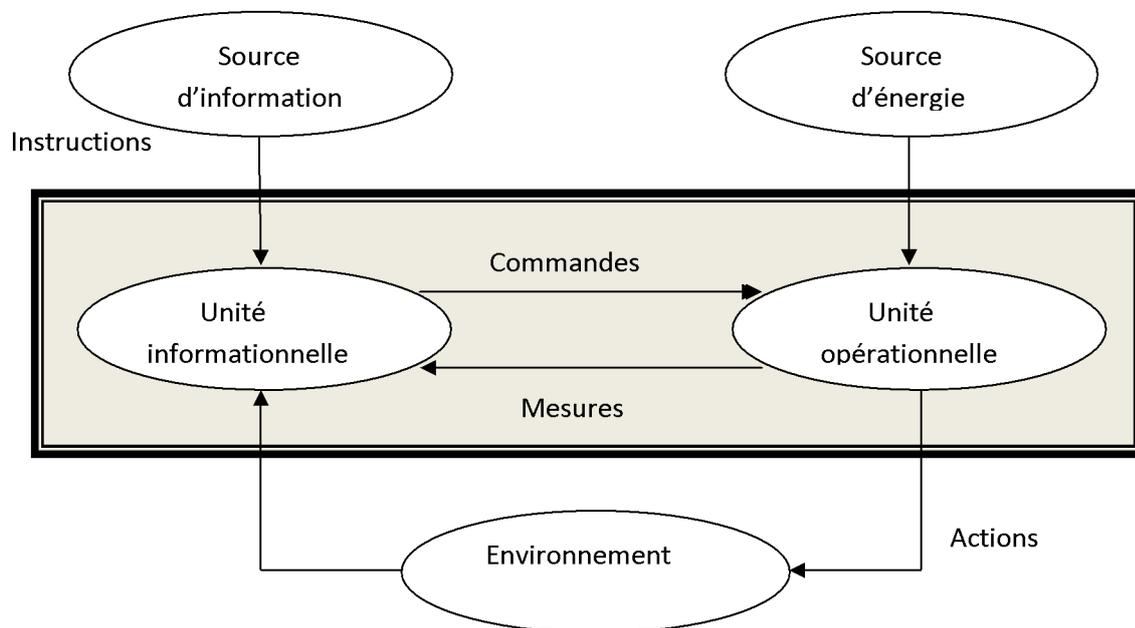


Figure I.1: Structure fonctionnelle d'un robot

Le système robotique lui-même se décompose en :

- Une unité informationnelle : qui reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras, et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de sa tâche.
- Une unité opérationnelle: qui exerce les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie.

I.6 Classification des manipulateurs :

L'AFRI (Association Française de la Robotique Industrielle) distingue quatre classes de robots manipulateurs selon leur niveau d'autonomie : [4]

1/ Les Télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle :

Ils sont commandés à distance et "en temps réel" par un opérateur humain. Cette télécommande se fait à plus ou moins longue distance par signaux mécaniques, hydrauliques, ou le plus souvent électriques. Ces manipulateurs sont employés en forge, fonderie, meulage-ébarbage, milieux "hostiles", etc... mais nécessitent toujours la présence et l'intervention constante d'un opérateur. Appelés aussi robots télécommandés, ils n'ont aucune autonomie.

2/ Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés :

Leurs mouvements sont limités par des butées et cames réglables à la main. Ils sont commandés à l'aide de logiques à relais ou pneumatiques (séquences fixes), ou par automates programmables et cartes à microprocesseurs (séquences variables). Généralement modulaires, ces appareils sont conçus pour une application déterminée.

3/ Les robots programmables :

Ils sont pilotés par des ordinateurs ou des armoires de commande numérique. Leurs mouvements continus dans l'espace sont alors programmés par apprentissage ou en langage symbolique par l'intermédiaire d'un clavier. Ils assurent des manipulations complexes, des opérations de soudage, usinage, découpe, peinture et pulvérisation, etc.

4/ Les robots dits "intelligents" :

Équipés de capteurs (par exemple un système de vision artificielle ou de suivi de joint en soudage), ils peuvent analyser les modifications de leur environnement ou de leur trajectoire et réagir en conséquence. Ces machines appelées robots de "deuxième génération" commencent à être répandus dans l'industrie. La "troisième génération" disposant de capacités de raisonnement grâce à l'intelligence artificielle fait aujourd'hui l'objet de recherches approfondies.

I.7 Caractéristiques d'un manipulateur:

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

- La charge maximale transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximale).
- L'architecture du S.M.A., le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace de travail (reachable Works pace), également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation. L'espace de travail dextre (dextrous workspace) est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'effecteur (organe terminal). [4]
- Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel) « défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien » et le point atteint est calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position et à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.[3]
- La répétabilité, ce paramètre caractérise la capacité qu'a le robot à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximale de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 mm.
- La vitesse de déplacement (vitesse maximale en élongation maximale), accélération.
- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance.

I.8 Structure mécanique d'un robot manipulateur et son Vocabulaire :

Les robots manipulateurs se présentent en général sous forme de structure mécanique poly articulée qui se terminent pas un organe terminal. L'architecture mécanique du robot varie selon le type de tâches qui lui sont destinées. D'une manière générale, on distingue au robot trois parties essentielles. Il s'agit: [2]

- **Le véhicule:** pour qu'un manipulateur exécute des tâches dans un lieu donné, il faut d'abord l'amener sur place. C'est le rôle du véhicule : engin terrestre, sous-marin, satellite etc....
Pour les robots à poste fixe, dépourvus de véhicule, on parle alors de base du manipulateur qui est fixée sur le lieu de travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.
- **Le porteur :** est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer et/ ou de prolonger son action. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés. Généralement une structure articulée, dont le rôle est d'amener l'extrémité du robot en divers points de son espace de travail.
- **L'organe terminal :** Sous le terme organe terminal, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques à dépression), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot enfin, peut-être multi-bras, dont chacun portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

- Actionneur=moteur
- Axe= articulation
- Corps=segment
- Organe terminal=effecteur
- Véhicule=base

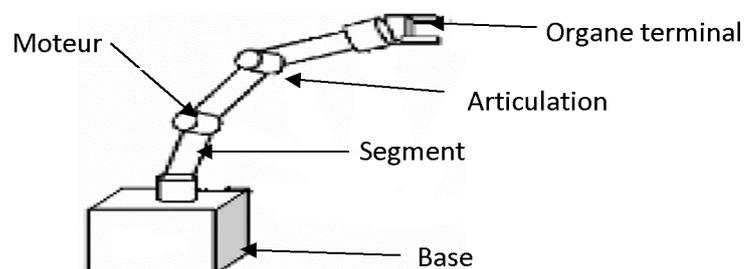


Figure I.2 : Représentation d'un bras manipulateur

I.9 Notions géométriques d'un manipulateur :

I. 9.1 Solides :

Un solide S est dit indéformable si pour toute paire de points de ce solide de coordonnées m et n, on a $\|m(t) - n(t)\| = \|m(0) - n(0)\| = \text{constante}$ au cours du temps.

I. 9.2 Notion de degré de liberté : (D.D.L) :

Dans l'espace réel à trois dimensions, un solide indéformable libre possède trois possibilités de translation et trois possibilités de rotation. On dit alors que le solide a six degrés de liberté; sa position à un instant donné, peut être décrite par six paramètres indépendants : trois paramètres de rotation définissant l'orientation du solide par rapport à un trièdre fixe « Ro » et trois paramètres décrivant les coordonnées d'un point particulier du solide dans ce même trièdre. Ainsi, les possibilités de translation assurent le déplacement tandis que les possibilités de rotation assurent l'orientation du solide. [4]

I.8.3 Liaison :

Une liaison entre deux solides indéformables limite le D.D.L d'un solide par rapport à l'autre. On appelle D.D.L de la liaison le nombre de paramètres indépendants permettant de définir la localisation (position et orientation) d'un solide par rapport à l'autre dans tout déplacement.[5]

Exemples :

- Un cube sur un plan à trois D.D.L. : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 1 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une porte par rapport au mur a 1 D.D.L.

I.9.4 Les articulations :

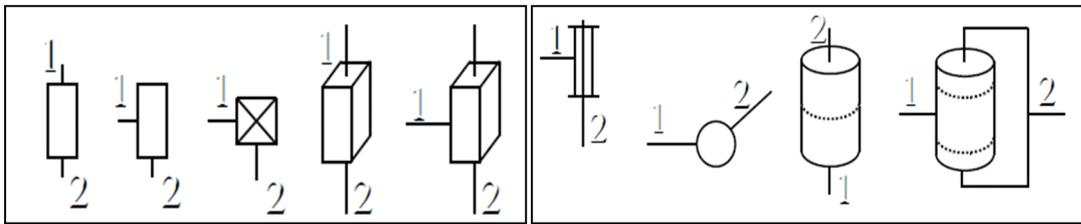
Les articulations sont des dispositifs qui lient deux corps successifs ; cette disposition permet le mouvement entre ces corps, ce qui a comme conséquence l'obtention d'un mouvement relatif des segments voisins.

Si les segments peuvent avoir des formes variées, les articulations qui sont des liaisons bilatérales ont par contre des caractéristiques bien précises. On peut ainsi distinguer deux groupes d'articulations: [4]

a) Les articulations simples : Elles sont caractérisées par une mobilité unique: c'est-à-dire que la liaison entre deux segments adjacents permet un seul mouvement relatif. Il s'agit:

- articulations rotoïdes : c'est une articulation de type pivot, ayant comme principe la réduction du mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leurs est commun, ce qui donne comme résultante un angle de rotation autour de cet axe.[6]
- articulations prismatiques: c'est une articulation de type glissière, réduisant le mouvement entre corps à une translation le long d'un axe commun, ce qui signifie.[7]

qu'il se produira un déplacement linéaire mesuré par une distance le long de cet axe.[6]



Figurée I.3: Des articulations prismatiques et rotoïdes

b) Les articulations complexes : Elles autorisent plusieurs degrés de mobilité et sont en général constituées par des dispositifs composés eux-mêmes de plusieurs articulations simples. Cependant en robotique, chaque articulation est généralement motorisée. De ce fait, les porteurs sont presque toujours composés exclusivement d'articulations simples. [6]

I.9.5 Mécanismes :

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

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

A titre d'exemple, le pantographe est un mécanisme en chaîne fermé. [4]

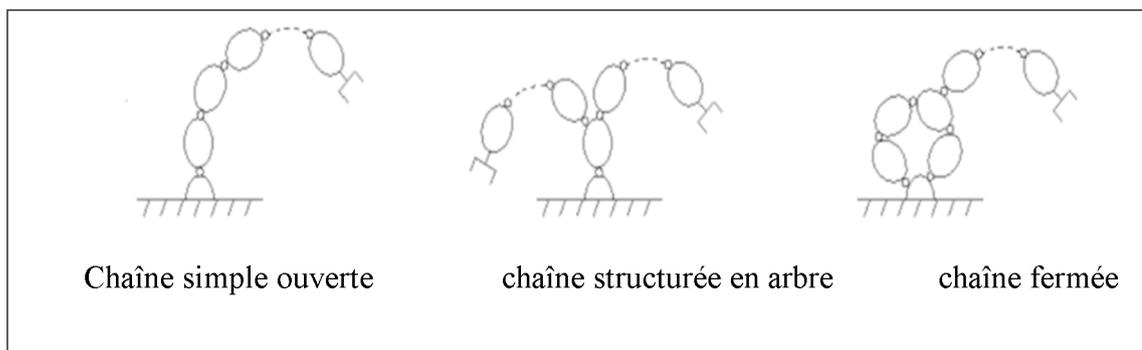


Figure I.4: Différent type de mécanismes

I.9.6 Morphologie des porteurs :

La structure d'un porteur est caractérisée par des corps rigides, les segments susceptibles de se mouvoir par rapport à une base et par des articulations limitant le mouvement relatif entre deux segments adjacents. On désigne fréquemment les bras manipulateurs en accolant les lettres R (pour rotoïde) et P (pour prismatique) pour décrire la succession des liaisons. Les porteurs sont souvent classés, du point de vue de la structure, suivant le système de coordonnées dans lequel ils opèrent. On définit ainsi cinq classes principales pour les robots : [1]

- **les robots cartésiens (PPP) :** Un manipulateur dont les trois premières articulations sont prismatiques est connu sous le nom de manipulateur cartésien. Il est montré dans la figure(I.5) Pour le manipulateur cartésien les variables articulaires sont les cartésiennes de l'organe terminal en respectant la base. Comme on peut le deviner la description cinématique de ce manipulateur est la plus simple de toutes les configurations.

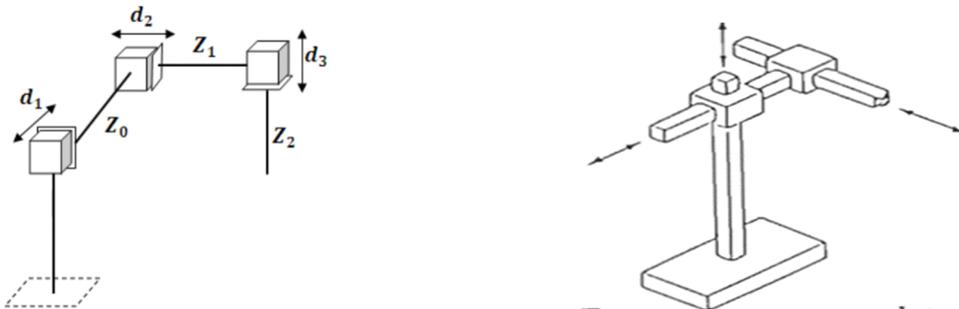


Figure I.5: Exemple de Configuration cartésienne (PPP)

- **les robots cylindriques (RPP):** La configuration cylindrique est montrée dans la figure(I.6), la première articulation est rotoïde et produit une rotation autour de la base, alors que la seconde et la troisième sont prismatiques. Comme le nom le suggère, les variables articulaires sont les coordonnées cylindriques de l'organe terminal en prenant compte de la base.[2]

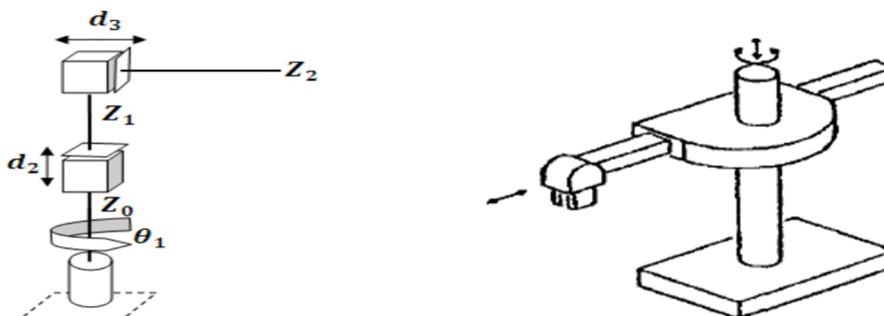


Figure I.6 : Exemple de Configuration cylindrique (RPP)

- **les robots sphériques (RRP)**: Les porteurs travaillant en coordonnées sphériques ont une structure de base comportant deux rotations et une translation; il s'agit alors d'un bras télescopique pouvant effectuer une rotation autour d'un axe vertical et une rotation autour d'un axe horizontal, ce qui donne à l'espace de travail du porteur la forme d'une coquille sphérique. Comme pour les porteurs cylindriques, l'existence des rotations réduit considérablement la résolution en bout de bras à cause de l'amplification des erreurs angulaires apparaissant au niveau des axes de rotation. Néanmoins, l'avantage d'une telle structure est qu'elle améliore la flexibilité dans l'utilisation.

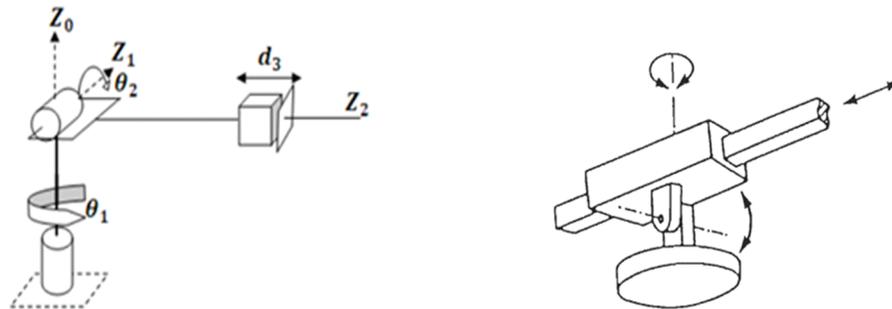


Figure I.7: Exemple de Configuration sphérique (RRP)

- **Les robots articulés (RRR)** : Les robots articulés ont une structure qui rappelle la plupart du temps celle d'un bras humain. En général, ils comprennent quatre segments principaux que l'on peut assimiler au tronc, au bras, à l'avant-bras et à la main; toutes les articulations du porteur articulé sont donc de type rotoïdes et vont souvent correspondre à l'épaule, au coude et au poignet. De ce fait, la résolution en bout de bras du porteur articulé, quoiqu'elle dépende de la position de travail, est toujours très mauvaise. Cependant, de toutes les structures, la structure articulée est celle qui offre la meilleure flexibilité et permet une grande souplesse dans l'exécution des tâches, d'où son utilisation fréquente dans les systèmes robotisés de petite et moyenne envergure. De plus, grâce aux progrès technologiques en matière d'asservissement, les robots articulés peuvent être utilisés pour des applications nécessitant une très grande précision.[5]

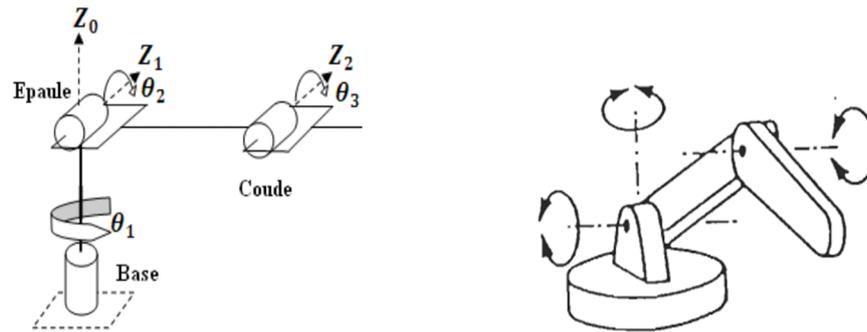


Figure I.8 : Exemple de Configuration articulée (RRR)

- **Le robot SCARA** (Selective Compliance Adaptive RobotArm) : SCARA est une configuration très connue, comme son nom sous-entend, il est spécialement conçu pour les opérations d'assemblage. Quoique le robot SCARA a une structure RRP, il est tout à fait différent de la configuration sphérique ni dans l'apparence ni dans le domaine d'application. A la différence du design sphérique qui a z_0 , z_1 , z_2 mutuellement perpendiculaires, le robot SCARA a z_0 , z_1 , z_2 parallèles. [7]

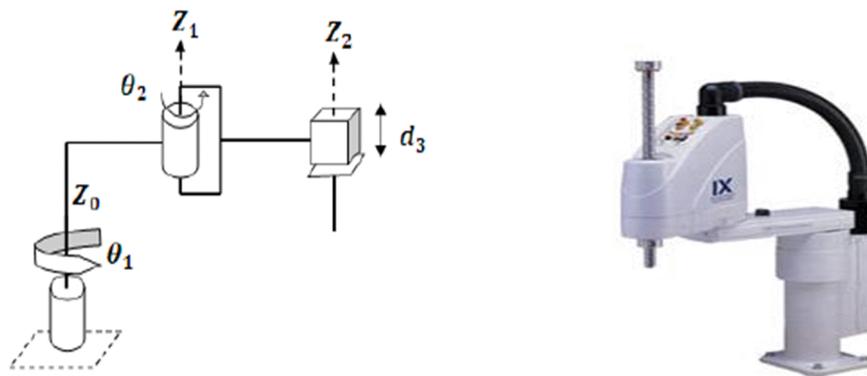


Figure I.9 : Exemple de Configuration SCARA

Nous résumons dans ce qui suit quelques structures du porteur les plus utilisées en robotique :

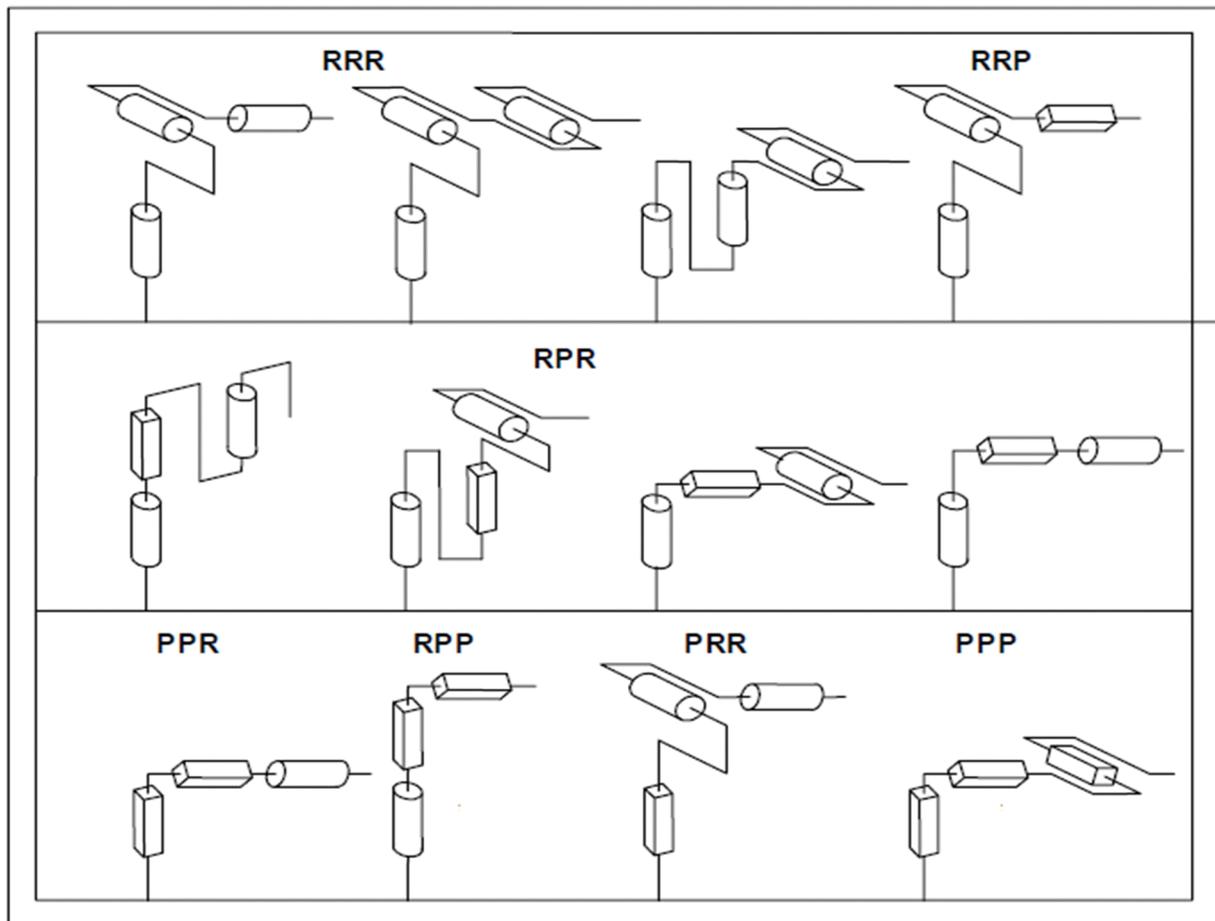


Figure I.10 : Différentes structures du porteur

I.10 Actionnement d'un manipulateur :

Le robot étant constitué de solides reliés par des articulations, c'est le mouvement de ces dernières qui va fournir la position de l'organe terminal. Pour faire mouvoir un solide, il faut lui fournir une certaine énergie conformément au principe de motorisation des axes.

Un axe robotisé comprend un organe moteur, permettant la mise en mouvement relatif de deux solides successifs qu'on appelle actionneur, et il transforme le type d'énergie qui lui est fournie en énergie mécanique.[8]

On peut classer les actionneurs suivant leurs énergies en trois types qui sont les suivant :

1. Actionneur hydraulique :

Les actionneurs hydrauliques sont des systèmes qui transforment l'énergie hydraulique (l'huile) en énergie mécanique. Il existe deux types d'actionneurs hydrauliques les vérins doubles effets et simples effets pour les mouvements de translation et les moteurs pour des mouvements rotatifs.

L'actionnement hydraulique est utilisé pour les manipulations de très grosses charges : exploitation forestière, portiques de grand gabarit, engins robotisés, etc...

2. Actionneur pneumatique :

Tous les systèmes qui transforment l'énergie pneumatique (l'air) en énergie mécanique sont des actionneurs pneumatiques. En robotique on parle généralement de vérins double et simple effet, qui sont considérés comme des actionneurs linéaires, utilisés pour des commandes en tout ou rien pour des automatismes de transfert.

3. Actionneur électrique :

La plus part des robots proposés par des constructeurs sont à actionnement électrique, en raison des nombreux avantages qu'elle présente. En effet, la disponibilité d'une grande panoplie de moteurs électriques et leur facilité de commande en plus de leur faible cout est l'un des atouts majeurs de cette énergie. Il existe plusieurs types de moteurs: moteur à courant continu, moteur pas à pas, servomoteur... etc.

I.11 Les capteurs d'un manipulateur :

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

En robotique, ce sont des outils de perception qui permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement. Il existe deux types de capteurs tels que :

- Les capteurs proprioceptifs : Ces capteurs assurent un contrôle permanent du système mécanique articulé. Ils interviennent dans les boucles de régulation, afin de permettre à l'unité de commande de suivre correctement, ou de modifier la trajectoire en cours, afin qu'elle soit conforme à celle exigée par la tâche (comme les capteurs de position, de vitesse ou d'accélération),
- Les capteurs extéroceptifs : Ces capteurs recueillent des informations sur l'environnement (comme la détection de présence, mesure de distance, etc...).

Les capteurs ont comme fonction de lire les variables relativement au mouvement du robot pour permettre un contrôle convenable.[7]

Conclusion :

La robotique est en constante évolution. Depuis ses débuts, chaque grande avancée est considérée comme un pas vers le robot du futur. Les robots d'aujourd'hui ne sont quasiment que des prototypes, mais comme toute avancée technologique, ils se perfectionnent avec le temps et leurs capacités vont certainement être au-dessus de nos espérances.

Dans ce chapitre, Nous avons pu définir certaines notions fondamentales liées à la robotique en général, ensuite pour revenir au vif du sujet (robots manipulateurs). Ainsi, nous nous sommes consacrés à la définition de notions relatives aux robots manipulateurs pour une meilleure compréhension de ce type de systèmes.

Dans ce qui va suivre, nous allons essayer d'apporter une explication sur tout ce qui concerne la géométrie en robotique ainsi établir le modèle géométrique du manipulateur à concevoir.

II.1 Introduction :

L'étude de la robotique nécessite des connaissances de base en géométrie en vue de situer ses différentes parties mobiles du robot les unes par rapport aux autres. Pour se faire, on a associé un repère à chaque partie (effecteur, articulations). Ainsi le passage d'un repère à un autre (position, orientation) s'exprime sous la forme d'une matrice de passage.

La géométrie et plus particulièrement les coordonnées et transformations homogènes sont des outils indispensables et très utilisés en robotique, ceci est justement l'objet d'une grande partie de ce chapitre.

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

Pour notre projet c'est la commande en position du manipulateur qui est recherchée, d'où la nécessité d'une modélisation géométrique.

II.2 Rappels :

II.2.1 Repère :

Les repères sont utilisés pour représenter graphiquement des données. En mathématiques, un repère est une collection d'éléments de référence permettant de désigner de manière simple n'importe quel objet d'un ensemble donné. Il est constitué d'un point de référence, en général noté 'O', qu'on appelle l'origine du repère et de trois droites orientées passant par l'origine qui sont le plus souvent de directions orthogonales. Ainsi en géométrie, un repère permet de définir les coordonnées de chaque point.

II.2.2 Coordonnées :

a) Coordonnées cartésiennes :

Ce sont les trois mesures algébriques x , y , et z , obtenues à partir de droites parallèles aux axes d'un repère. Ce système de coordonnées est le plus simple et le plus utilisé pour repérer un point dans l'espace. Les coordonnées x , y , z d'un point sont des nombres réels.

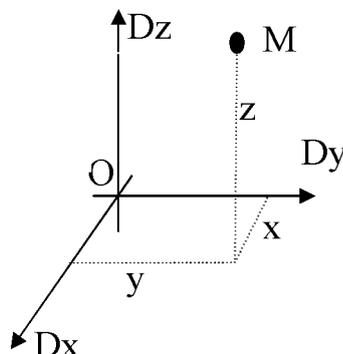


Figure II.1 : Coordonnées cartésiennes d'un point M

b) Coordonnées polaires et cylindriques:

Les coordonnées polaires sont, en mathématiques un système de coordonnées à deux dimensions dans lequel chaque point du plan est entièrement déterminé par un angle et une distance.

Avec :

- distance à l'origine $r = OM$
- un angle $\theta = (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OM})$ où A est un point arbitraire différent de O

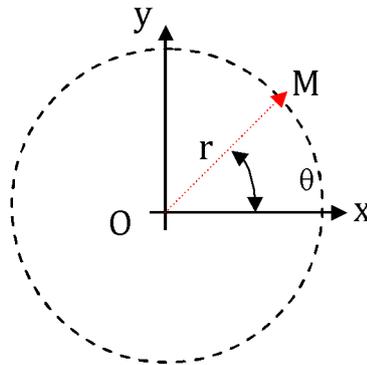


Figure II.2 : Coordonnées polaires d'un point M

Un système de coordonnées cylindriques est un système qui étend le système de coordonnées polaires à deux dimensions en y ajoutant une troisième dimension qui mesure la hauteur d'un point par rapport au plan repéré par les coordonnées polaires. Les coordonnées cylindriques du point M sont r , θ et h .

A partir des coordonnées cartésiennes (x, y, z) , on peut obtenir les coordonnées polaires et cylindriques (r, θ, z) grâce aux formules suivantes :

- $x=r \cos(\theta)$
- $y=r \sin(\theta)$
- $z= h$ (pour les coordonnées cylindriques).
-

Inversement, connaissant x , y et z , il est possible de déterminer r et θ :

- $r=\sqrt{x^2 + y^2}$
- $\theta=\text{Arctan2}(x, y)$
- $h=z$

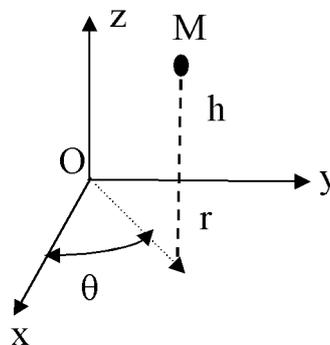


Figure II.3 : Coordonnées cylindriques d'un point M

c) Coordonnées sphériques :

Les coordonnées sphériques permettent de repérer un point sur une sphère de rayon $OM = r$.

Le point M est repéré par :

- Le rayon r de la sphère à laquelle il appartient.
- L'angle θ entre la direction Oz et la direction OM . $\theta = (Oz, OM)$.
- L'angle ϕ entre la direction Ox et la direction Om ou m est la projection de M dans le plan xOy : $\phi = (Ox, Om)$

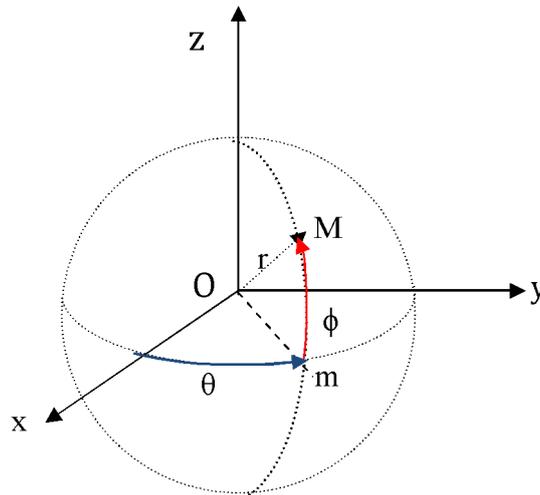


Figure II.4 : Coordonnées sphériques d'un point M

Connaissant les coordonnées cartésiennes (x, y, z) , il est possible de déterminer les coordonnées sphériques; ainsi:

- $x = r \sin \theta \cos \phi$
- $y = r \sin \theta \sin \phi$
- $z = r \cos \theta$

II.2. 3 Rappel sur les vecteurs :

Un vecteur est représenté par un segment orienté, possédant trois éléments caractéristiques qui sont la direction, le sens et la norme (la longueur du segment).

Soient \vec{u} et \vec{v} deux vecteurs. Pour obtenir graphiquement le représentant de leur somme $\vec{u} + \vec{v}$, deux cas différents se présentent à nous :

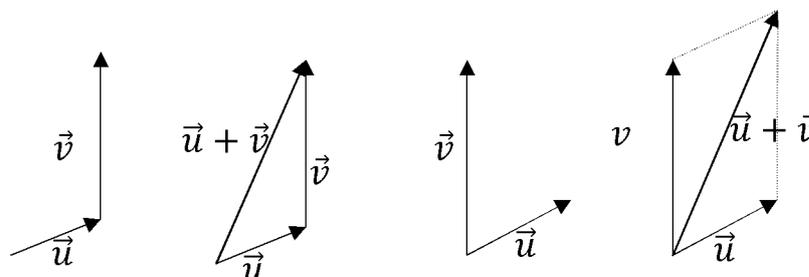


Figure II.5 : Représentation graphique des vecteurs

Le produit scalaire de deux vecteurs est un nombre réel qui s'obtient à partir de l'équation suivante :

$$u \cdot v = \|u\| \cdot \|v\| \cos(u, v)$$

Le produit vectoriel de deux vecteurs est un vecteur \vec{w} noté : $\vec{w} = \vec{u} \wedge \vec{v}$, dont :

- le module est : $\|\vec{w}\| = \|\vec{u}\| \|\vec{v}\| \sin(\vec{u}, \vec{v})$.
- sens : trièdre $(\vec{w}, \vec{u}, \vec{v})$ direct
- direction : $\vec{w} \perp \vec{v}$ et $\vec{w} \perp \vec{u}$.

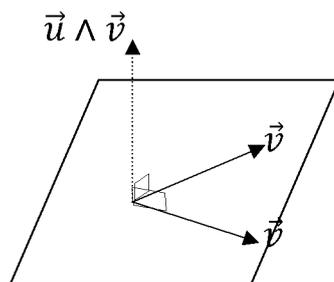


Figure II.6: produit vectoriel de deux vecteurs

Le calcul des composantes d'un produit vectoriel se fait à partir de la méthode suivante :

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{bmatrix} u_2 v_3 - u_3 v_2 \\ u_3 v_1 - u_1 v_3 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{bmatrix} \quad \text{Avec : } \vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

II.2.4 Méthode Cramer :

Soit un système d'équations linéaires avec autant d'équations que d'inconnues et dont le déterminant de la matrice de coefficients est non nul.

$$\begin{cases} a x + b y = e \\ c x + d y = f \end{cases}$$

$$\text{Si : } a d - b c \neq 0$$

Alors, il existe une seule solution :

$$x = \frac{\begin{vmatrix} e & b \\ f & d \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}} = \frac{e d - f b}{a d - b c} \quad \text{et} \quad y = \frac{\begin{vmatrix} a & e \\ c & f \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}} = \frac{a f - c e}{a d - b c}$$

II.2. 5 Transformations rigides :

On appelle transformation rigide le résultat d'un mouvement rigide amenant un solide d'une situation initiale à une situation finale. Une transformation rigide est représentée par une application unique qui transforme les coordonnées des points du solide S de leur position initiale vers leur position finale.

A l'inverse, une application représentera une transformation rigide si elle conserve à la fois les distances et l'orientation.[9]

II.3 Transformations homogènes :

Dans le cas d'une transformation homogène, le type de représentation est matriciel. Le passage d'un repère initial R_i à un repère final R_f s'exprime par l'intermédiaire d'une matrice M ou T, appelée matrice de changement de repère, matrice de passage ou matrice de transformation homogène.[11]

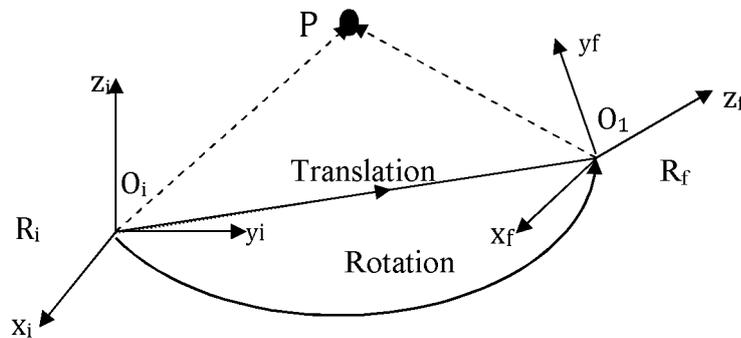


Figure II.7 : Passage d'un repère R_i à un repère R_f

En robotique, cette matrice de dimension (4×4) , notée iM_f s'exprime sous la forme suivante :

$${}^iT_f = {}^iM_f = ({}^is_j \ {}^in_j \ {}^ia_j \ {}^ip_j) = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^iR_f & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ou :

${}^is_j, {}^in_j$ Et ia_j sont les vecteurs unitaires, suivant les axes x_j, y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i , ou ip_j est le vecteur exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i et avec :

- iR_f : matrice (3×3) des rotations donnant l'orientation notée iA_f (de R_f dans R_i)
- iP_f : matrice (3×1) des translations donnant la position

$${}^iM_f = \begin{pmatrix} {}^iR_f & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^iA_f & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} {}^iA_f & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A l'aide de la matrice iM_f , il est possible d'exprimer les coordonnées d'un point quelconque P de l'espace dans le repère R_i à partir de ces coordonnées homogènes exprimées dans le repère R_f par la relation :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}_{R_i} = {}^iM_f \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_f} = \begin{pmatrix} {}^iR_f & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_f}$$

II.3.1 Matrice de transformations homogènes de translation pure :

Lorsque deux repères sont uniquement liés par une translation, il est possible de passer de l'un à l'autre en utilisant une matrice de transformation homogène de translation pure. Nous utiliserons les notations suivantes :

- Trans (a, b, c) pour indiquer une translation (a selon l'axe x, b selon l'axe y et c selon l'axe z)
- Trans (x, a) pour indiquer une translation a selon l'axe x
- Trans (y, b) pour indiquer une translation b selon l'axe y
- Trans (z, c) pour indiquer une translation c selon l'axe z

Considérons une translation T composée d' :

- Une translation a selon l'axe x → Trans (a, 0, 0) = Trans (x, a)
- Une translation b selon l'axe y → Trans (0, b, 0) = Trans (y, b)
- Une translation c selon l'axe z → Trans (0, 0, c) = Trans (z, c)

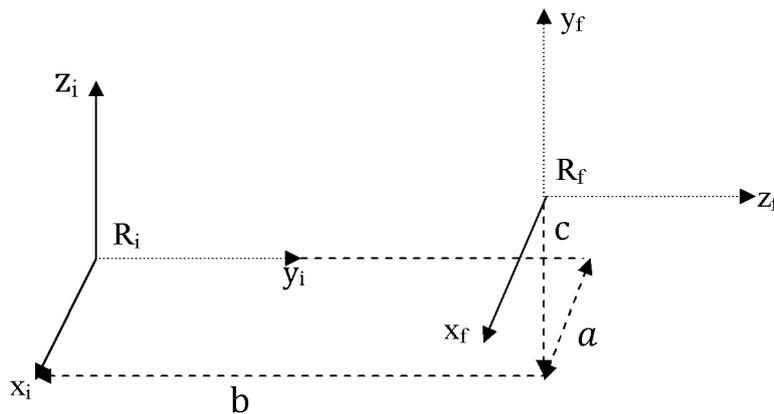


Figure II.8 : Translation pure d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

La figure (II.8) montre un exemple de cette translation, associée à la matrice de transformation homogène de translation pure iM_f . Les matrices de translation sont liées par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Trans}(a, b, c) &= \text{Trans}(a, 0, 0) \cdot \text{Trans}(0, b, 0) \cdot \text{Trans}(0, 0, c) \\ &= \text{Trans}(x, a) \cdot \text{Trans}(y, b) \cdot \text{Trans}(z, c) \end{aligned}$$

La matrice de transformation homogène de translation pure iM_f associée à cette translation s'exprime alors :

$${}^iM_f = \begin{pmatrix} I_3 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_3 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

II.3.2 Matrice de transformation homogène de rotation pure :

Lorsque deux repères sont uniquement liés par une rotation, il est possible de passer de l'un à l'autre en utilisant une matrice de transformation homogène de rotation pure. Nous utiliserons les notations suivantes :

- Rot (x, θ_x) pour indiquer une rotation (θ_x autour de l'axe x)
- Rot (y, θ_y) pour indiquer une rotation (θ_y autour de l'axe y)
- Rot (z, θ_z) pour indiquer une rotation (θ_z autour de l'axe z)

Dans la matrice de transformation homogène, la rotation est décrite par la matrice R . Lorsque la rotation est nulle autour des trois axes, R devient la matrice identité (c'est le cas pour les rotations pures) :

$$R = I_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Rotation θ_x autour de l'axe x : Notons $({}^iR_f \ {}^jR_f \ {}^kR_f)$ la base associée au repère R_f et $({}^iR_i \ {}^jR_i \ {}^kR_i)$ la base associée au repère R_i . La matrice de rotation R est obtenue en décrivant $({}^iR_f \ {}^jR_f \ {}^kR_f)$ fonction de $({}^iR_i \ {}^jR_i \ {}^kR_i)$:

$$\begin{aligned} {}^iR_f &= 1 \ {}^iR_i + 0 \ {}^jR_i + 0 \ {}^kR_i = {}^iS_f \\ {}^jR_f &= 0 \ {}^iR_i + \cos\theta_x \ {}^jR_i + \sin\theta_x \ {}^kR_i = {}^jn_f \\ {}^kR_f &= 0 \ {}^iR_i - \sin\theta_x \ {}^jR_i + \cos\theta_x \ {}^kR_i = {}^ks_f \end{aligned}$$

Sous forme matricielle on aura :

$$R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix} .$$

Pour simplifier les écritures on pose :

$$\cos\theta_x = c\theta_x$$

$$\sin\theta_x = s\theta_x$$

On aura :

$$R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_x & -s\theta_x \\ 0 & s\theta_x & c\theta_x \end{pmatrix} , \quad {}^i M_f = R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_x & -s\theta_x & 0 \\ 0 & s\theta_x & c\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

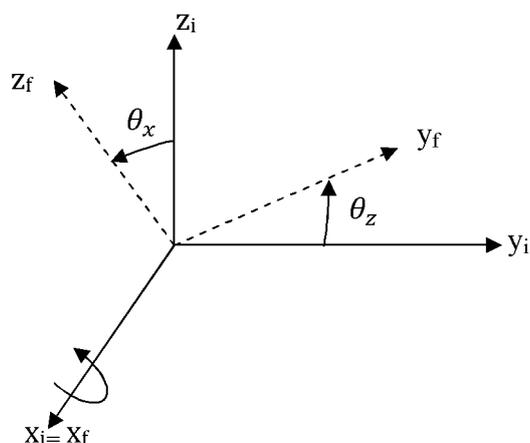


Figure II.9 : Rotation pure autour de l'axe « x » d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

➤ Rotation θ_y autour de l'axe y :

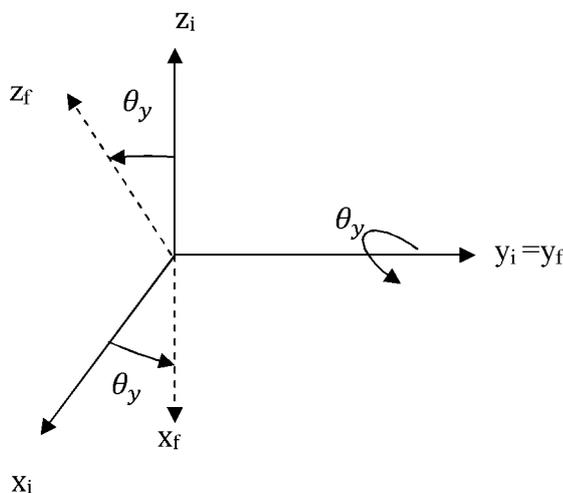


Figure II.10 : Rotation pure autour de l'axe y d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

$${}^i R_f = c\theta_y {}^i R_i + 0 {}^j R_i - s\theta_y {}^k R_i = {}^i S_f$$

$${}^j R_f = 0 {}^i R_i + 1 {}^j R_i + 0 {}^k R_i = {}^i n_f$$

$${}^k R_f = s\theta_y {}^i R_i + 0 {}^j R_i + c\theta_y {}^k R_i = {}^i S_f$$

Sous forme matricielle on aura :

$$R_{(\theta_y, y)} = \begin{pmatrix} c\theta_y & 0 & s\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_y & 0 & c\theta_y \end{pmatrix}, \quad {}^i M_f = R_{(\theta_y, y)} = \begin{pmatrix} c\theta_y & 0 & s\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta_y & 0 & c\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

➤ Rotation θ_z autour de l'axe z :

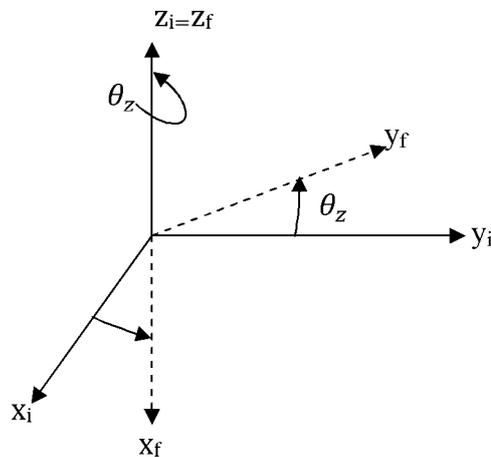


Figure II.11 : Rotation pure autour de l'axe z d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

$${}^i R_f = c\theta_z {}^i R_i + s\theta_z {}^j R_i + 0 {}^k R_i = {}^i S_f$$

$${}^j R_f = -s\theta_z {}^i R_i + c\theta_z {}^j R_i + 0 {}^k R_i = {}^i n_f$$

$${}^k R_f = 0 {}^i R_i + 0 {}^j R_i + 1 {}^k R_i = {}^i S_f$$

Sous forme matricielle on aura :

$$R_{(\theta_z, z)} = \begin{pmatrix} c\theta_z & -s\theta_z & 0 \\ s\theta_z & c\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad {}^i M_f = R_{(\theta_z, z)} = \begin{pmatrix} c\theta_z & -s\theta_z & 0 & 0 \\ s\theta_z & c\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

II.3.3 Propriétés des matrices de transformation homogène :

Nous avons vu qu'une matrice de transformation homogène T peut se mettre sous la forme suivante :

$${}^i T_f = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i A_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec :

${}^i A_f$: Matrice (3×3) des rotations donnant l'orientation (de R_f dans R_i)

${}^i P_f$: Matrice (3×1) des translations donnant la position (de R_f dans R_i)

- **Propriété 1** : La matrice de rotation A est orthogonale : $A^{-1} = A^T$.

Les éléments de la matrice A de rotation représentent les cosinus directeurs d'orientation (s, n, a). La matrice de rotation A ne contient que trois paramètres indépendants sur les 9 qui la constituent (trois angles de rotations). Un des vecteurs s, n ou a se déduit du produit vectoriel des deux autres, car ils constituent une base orthonormée, par exemple :

$$s = n \wedge a$$

$$n \cdot a = 0$$

$$\|n\| = \|a\| = 1$$

- **Propriété 2** : Soit la matrice ${}^i T_j$ de transformation homogène prenant le repère R_i pour l'amener sur le repère R_j . Si ${}^j T_i$ est la matrice de transformation homogène prenant le repère R_j pour l'amener sur le repère R_i , alors ${}^i T_j$ et ${}^j T_i$ sont liés par la relation : $({}^i T_j)^{-1} = {}^j T_i$.

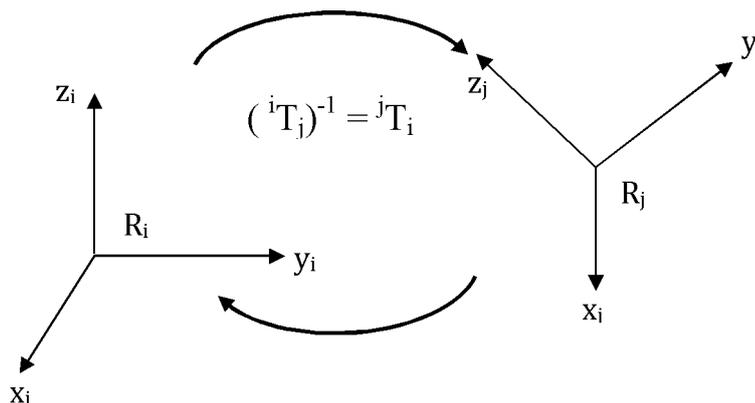


Figure II.12 : Passage direct et inverse d'un repère R_i à un repère R_j

- **Propriété 3 :** Soit la matrice T de transformation homogène effectuant une rotation d'angle θ_u autour de l'axe u (indifféremment x , y ou z). La matrice inverse T^{-1} est également une matrice de transformation homogène effectuant une rotation autour de l'axe u , mais d'angle $-\theta_u$:

$$(T)^{-1} = (\text{Rot}(u, \theta_u))^{-1} = \text{Rot}(u, -\theta_u) = \text{Rot}(-u, \theta_u)$$

En utilisant cette propriété, on en déduit :

$$\text{Rot}(x, -\theta_x) = (\text{Rot}(x, \theta_x))^T = (\text{Rot}(x, \theta_x))^{-1}$$

$$\text{Rot}(y, -\theta_y) = (\text{Rot}(y, \theta_y))^T = (\text{Rot}(y, \theta_y))^{-1}$$

$$\text{Rot}(z, -\theta_z) = (\text{Rot}(z, \theta_z))^T = (\text{Rot}(z, \theta_z))^{-1}$$

Cette propriété est également vraie pour les matrices de transformation homogène de translation pure :

$$\text{Trans}(x, a) = \text{Trans}(-x, a) = \text{Trans}(x, -a)$$

$$\text{Trans}(y, b) = \text{Trans}(-y, b) = \text{Trans}(y, -b)$$

$$\text{Trans}(z, c) = \text{Trans}(-z, c) = \text{Trans}(z, -c)$$

- **Propriété 4 :** Si un repère R_0 à subir K transformations consécutives, et si la $i^{\text{ème}}$ ($i = 1, 2, \dots, k$) est définie par rapport au repère R_{i-1} , alors on a :

$${}^0T_k = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \dots {}^{k-1}T_k$$

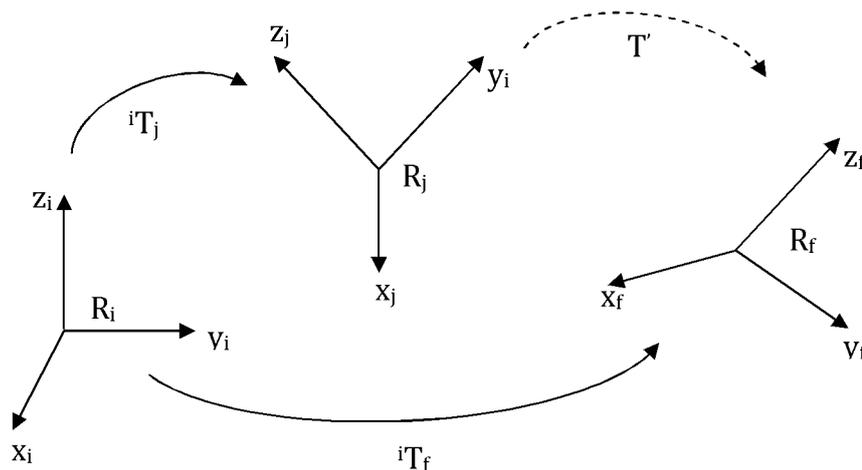


Figure II.13 : Composition à droite et à gauche d'une transformation

II.4 Situation d'un solide dans l'espace :

La situation d'un solide dans l'espace est exprimée par une matrice de transformation homogène de la forme :

$$T_f = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^iA_f & {}^iP_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec :

- A matrice (3×3) des rotations donnant l'orientation du solide dans un repère fixe R_0
- P matrice (3× 1) des translations donnant la position du solide dans un repère fixe R_0

Nous allons présenter quelques méthodes de description usuelles en robotique, pour décrire la situation d'un repère R_n associé à un solide quelconque dans un repère de référence R_0 . Nous aborderons d'abord les différentes méthodes permettant de représenter la position du solide, puis celles permettant de paramétrer l'orientation de ce même solide.

II.4.1 Description de la position d'un solide :

La position de l'origine d'un repère lié à un solide R_n par rapport à un repère de référence R_0 peut être définie par différents types de coordonnées :

- Cartésiennes : C'est la méthode la plus générale. Elle donne directement les composantes du vecteur de position P. Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est cartésienne. La matrice de position est la suivante :

$$P_{car} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

- Cylindriques : Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est cylindrique. La matrice de position est la suivante :

$$P_{cyl} = \begin{pmatrix} r. c\alpha \\ r. s\alpha \\ z \end{pmatrix}$$

- sphériques. Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est sphérique. La matrice de position est la suivante :

$$P_{sph} = \begin{pmatrix} r. c\alpha. s\beta \\ r. s\alpha. s\beta \\ r. c\beta \end{pmatrix}$$

II.4.2 Description de l'orientation d'un solide :

Pour décrire l'orientation d'un solide, le choix de trois paramètres se révèle parfois difficile. Aussi, on se ramène à des représentations redondantes. Les méthodes les plus utilisées sont les suivantes :

1. Les cosinus directeurs : La description de l'orientation d'un solide par les cosinus directeurs est donnée par les trois vecteurs s , n et a constituant 9 éléments appelés cosinus directeurs. La matrice d'orientation est la suivante :

$$\begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La connaissance de deux vecteurs choisis parmi les trois est suffisante (le troisième est obtenu par le produit vectoriel des deux autres). 3 composantes seulement sont indépendantes, mais dans le cas général, il est difficile de les fixer. La description de l'orientation d'un solide par les cosinus directeurs est une méthode redondante.

2. les angles d'Euler : Dans ce cas, l'orientation d'un repère R_n associé à un solide quelconque dans un repère référence R_0 , est déterminée par la spécification de trois angles correspondants à trois rotations successives (x, y, z). Les angles d'Euler sont définis comme suit :

- φ (précession) : $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$
- θ (nutation) : $0 \leq \theta \leq 180^\circ$
- ψ (rotation propre) : $0 \leq \psi \leq 360^\circ$

La composition de ces trois rotations permet de calculer la matrice d'orientation. En effet, on a :

$${}^iA_j = A(z, \varphi) \cdot A(x, \theta) \cdot A(z, \psi)$$

$${}^iA_j = \begin{bmatrix} C\varphi & -S\varphi & 0 \\ S\varphi & C\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\psi & -S\psi & 0 \\ S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On obtient :

$${}^iA_j = \begin{bmatrix} C\varphi C\psi - C\theta S\varphi S\psi & -C\varphi S\psi - C\theta C\psi S\varphi & S\varphi S\theta \\ C\psi S\varphi + C\varphi C\theta S\psi & C\varphi C\theta C\psi - S\varphi S\psi & -C\varphi S\theta \\ S\theta S\psi & C\psi S\theta & C\theta \end{bmatrix}$$

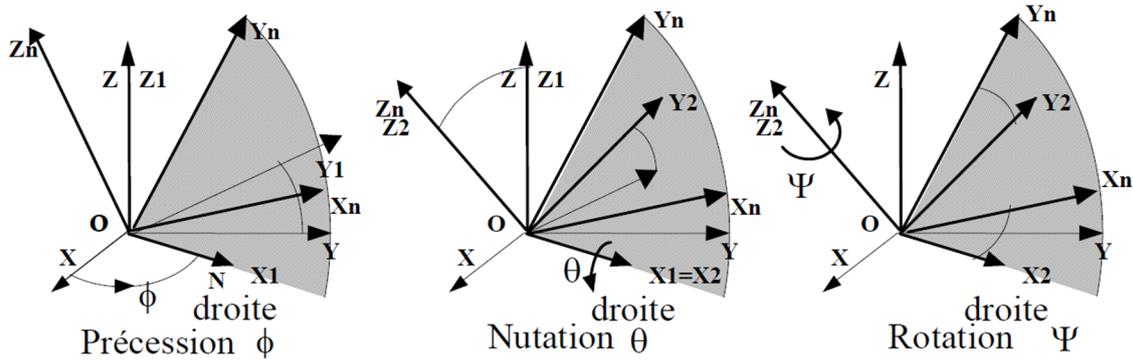


Figure II.14 : Les angles d'Euler (convention z, x, z)

On peut montrer, que pour passer des cosinus directeurs aux angles d'Euler, les relations suivantes sont utilisables :

$$\phi = \text{atan2}(-a_x, a_y) \text{ à } 180^\circ \text{ et } \phi = \text{atan2}(a_x, -a_y) + 180^\circ$$

$$\theta = \text{atan2}(S\phi \cdot a_x - C\phi \cdot a_y, a_z)$$

$$\psi = \text{atan2}(-C\phi \cdot n_x - S\phi \cdot n_y, C\phi \cdot s_x + C\phi \cdot s_y)$$

3. Les angles de Bryant : Comme pour les angles d'Euler, l'orientation d'un repère R_n , associé à un solide quelconque dans un repère de référence R_0 , est déterminée par la spécification de 3 angles correspondants à 3 rotations successives (x, y, z). La composition de ces trois rotations permet de calculer la matrice d'orientation. En effet, on a :

$${}^i A_j = A(x, \theta_1) \cdot A(y, \theta_2) \cdot A(z, \theta_3)$$

D'où :

$${}^i A_j = \begin{bmatrix} C\theta_2 \cdot C\theta_3 & C\theta_1 \cdot S\theta_3 + S\theta_1 \cdot S\theta_2 \cdot C\theta_3 & S\theta_1 \cdot S\theta_3 - C\theta_1 \cdot S\theta_2 \cdot C\theta_3 \\ -C\theta_2 \cdot S\theta_3 & C\theta_1 \cdot C\theta_3 - S\theta_1 \cdot S\theta_2 \cdot S\theta_3 & S\theta_1 \cdot C\theta_3 + C\theta_1 \cdot S\theta_2 \cdot S\theta_3 \\ S\theta_2 & -S\theta_1 \cdot C\theta_2 & C\theta_1 \cdot S\theta_2 \end{bmatrix}$$

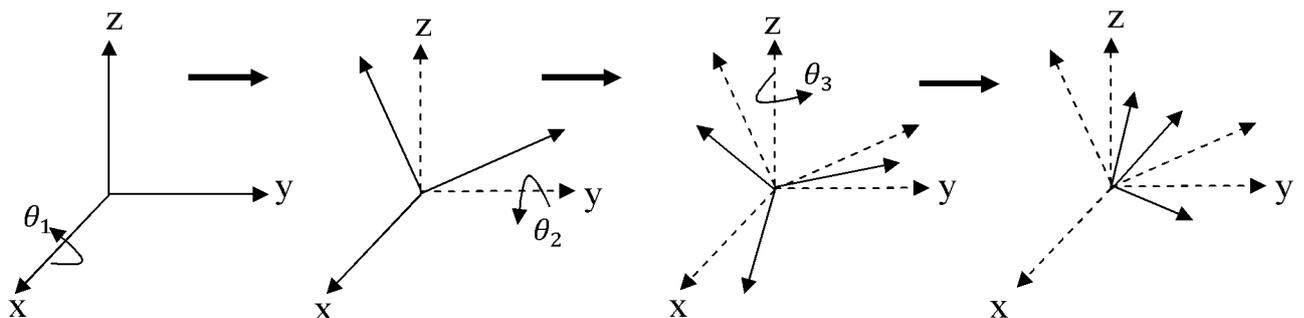


Figure II.15 : Les angles de Bryant (convention x, y, z)

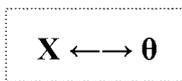
On peut montrer que le passage des cosinus directeurs aux angles de Bryant est obtenu par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \text{atan2}(-n_z, a_z) \text{ à } 180^\circ \text{ et } (\theta_1 = \text{atan2}(n_z, -a_z) + 180^\circ) \\ \theta_2 &= \text{atan2}(s_z, C\theta_1 \cdot a_z - s\theta_1 \cdot n_z) \\ \theta_3 &= \text{atan2}(C\theta_1 \cdot n_x + s\theta_1 \cdot a_x, C\theta_1 \cdot n_y + S\theta_1 \cdot a_y)\end{aligned}$$

II.5 Introduction à la modélisation :

La conception et la commande des robots manipulateurs nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que :

- Les modèles de transformation entre :
 - L'espace opérationnel X (dans lequel on définit la situation de l'organe terminal)
 - L'espace articulaire θ (dans lequel on définit la configuration du robot)



Parmi les modèles de transformation, on distingue :

- Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme articulaire et inversement.

La modélisation des robots de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées [Denavit 55], [Sheth 71], [Renaud 75], [Khalil 76], [Borrel 79], [Craig 86]. La plus répandue est celle de Denavit-Hartenberg [Denavit 55]. Mais cette méthode développée pour des structures ouvertes simples, présente des ambiguïtés lorsqu'elle est appliquée sur des robots ayant des structures fermées ou arborescentes.

Dans les années 80, Wisama Khalil propose une modification de cette méthode : méthode de Denavit-Hartenberg modifiée (dite méthode de Khalil). Cette méthode permet la description homogène en un nombre minimal de paramètres pour la représentation des différentes structures de robots généralement rencontrés.[11]

II.6 Description de la structure géométrique d'un robot :

II.6.1 Notations et règles générales :

La méthode de description est fondée sur les règles et conventions suivantes :[12]

- La variable de l'articulation j est notée θ_j
- Le corps j est noté C_j
- Les corps sont supposés parfaitement rigides. Ils sont connectés par des articulations, considérées comme idéales, soit rotoïdes, soit prismatiques.
- Le repère R_j est lié au corps C_j
- L'axe du z_j repère R_j , est porté par l'axe articulaire j
- Les paramètres qui permettent de définir le repère R_j , par rapport au repère antécédent sont munis de l'indice j.

II.6.2 Description des robots à chaîne ouverte simple :

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps $C_0, C_1, C_2 \dots C_n$ et de « n » articulations (voir figure II.16).

Le corps C_0 désigne la base du robot.

Le corps C_n est celui qui porte l'organe terminal.

L'articulation j connecte le corps C_j au corps C_{j-1} .

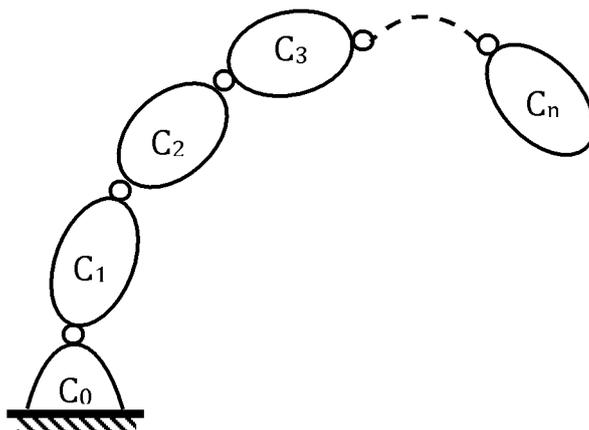


Figure II.16 : Robot à structure ouverte simple

II.6.3 Paramétrage de Denavit-Hartenberg : [13]

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

- z_j est porté par l'axe articulaire j
- x_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j+1} , si z_j et z_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, le choix de x_j n'est pas unique. Dans ce cas, des considérations de symétrie ou simplicité permettent alors un choix rationnel.
- y_j est l'axe qui forme un trièdre direct : $y_j = z_j \wedge x_j$

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j , s'exprime en fonction des 4 paramètres suivants :

- α_j est l'angle entre z_{j-1} et z_j autour de x_j
- d_j est la distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_{j-1}
- θ_j est l'angle entre x_{j-1} et x_j autour de z_{j-1}
- r_j est la distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_j

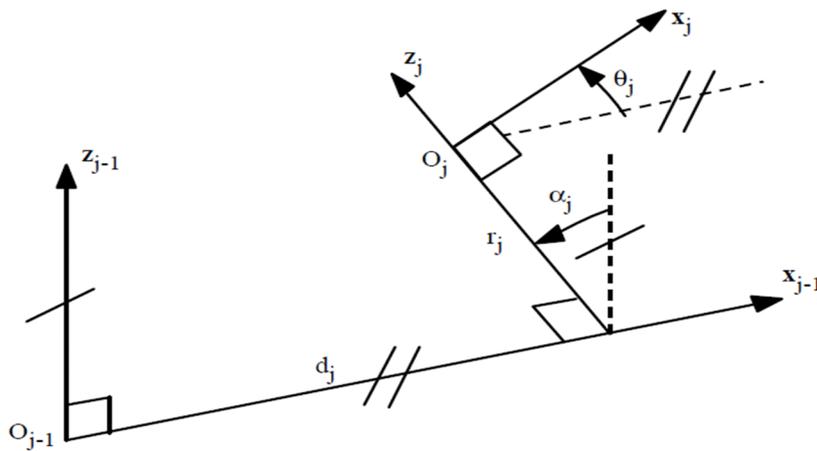


Figure II.17 : Paramètres géométriques dans le cas d'une structure en chaîne simple

Ces quatre paramètres r_j , d_j , α_j et θ_j sont appelés les paramètres de Denavit et Hartenberg. La configuration de Denavit et Hartenberg est constituée de quatre transformations élémentaires pour une transformation de R_{j-1} à R_j :

- 1- Rotation autour de z d'un angle θ_j
- 2- Translation le long de z d'une distance d_j
- 3- Translation le long de x d'une distance r_j
- 4- Rotation autour de x d'un angle α_j

La matrice de transformation homogène définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est défini comme suit :

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(z, \theta_j) \text{Trans}(z, d_j) \text{Trans}(x, r_j) \text{Rot}(x, \alpha_j)$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & 0 \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation homogène s'écrit donc :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \cos \alpha_j & \sin \theta_j \sin \alpha_j & r_j \cos \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\cos \theta_j \sin \alpha_j & r_j \sin \theta_j \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

II.7 Calcul du modèle géométrique du manipulateur à concevoir :

Dans notre cas la structure du manipulateur à modéliser est une chaîne ouverte simple composée de trois corps C_0, C_1, C_2 et de 3 articulations rotoïdes (RRR). Le schéma de la représentation géométrique et le placement des repères est illustré par la figure (II.18).

Pour déterminer les paramètres de Denavit-Hartenberg, il faut procéder par étape comme suit:

1. disposer les axes z_j sur les axes articulaires.
2. disposer les axes x_j en prenant la convention $x_j = z_j \wedge z_{j+1}$ (trièdre direct). Il se peut que pour des raisons de simplicité, qu'il soit préférable de prendre la convention trièdre indirecte.
3. disposer les axes y_j en prenant la convention $y_j = z_j \wedge x_j$ (Trièdre direct).

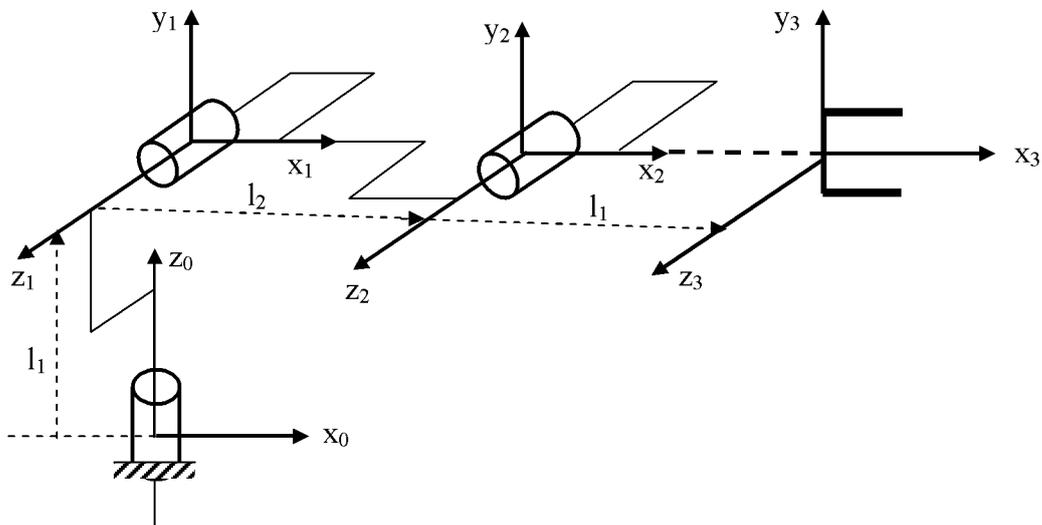


Figure II.18 : Schéma de la représentation géométrique et placement des repères du manipulateur

Le tableau des paramètres de Denavit-Hartenberg relatif au manipulateur est le suivant :

Segment	θ_j	r_j	d_j	α_j
1	θ_1	0	l_1	$\frac{\pi}{2}$
2	θ_2	l_2	0	0
3	θ_3	l_3	0	0

II.7.1 Modèle géométrique direct :

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires.

Le modèle géométrique direct peut être représenté par la relation suivante :

$$\mathbf{X} = f(\boldsymbol{\theta})$$

Tel que, \mathbf{X} est le vecteur des coordonnées choisies pour représenter la position de l'organe terminal par rapport au repère de base R_0 à partir de la connaissance de $\boldsymbol{\theta}$, le vecteur des coordonnées articulaires. Plusieurs possibilités sont offertes pour définir le contenu du vecteur \mathbf{X} .

Plusieurs possibilités existent pour la définition du vecteur \mathbf{X} , mais la plus utilisée est celle de la matrice de transformation homogène 0T_n tel que :

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n$$

La détermination de la matrice de passage homogène 0T_n donnant la position et l'orientation de l'organe terminal par rapport au repère de base peut se faire à partir de la connaissance des paramètres géométriques et au moyen du formalisme de Denavit et Hartenberg. [14]

Dans notre configuration, on a :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3$$

Calculons 0T_1 , 1T_2 , 2T_3 :

Pour le premier corps on obtient : ${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Pour le deuxième corps on obtient : ${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Pour le troisième corps on obtient : ${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Et on aura :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par identification on obtient :

$$s_x = \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_x = -\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2 = -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_x = \sin \theta_1$$

$$s_y = \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_1 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_y = -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_y = -\cos \theta_1$$

$$s_z = \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_2 = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_z = \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_z = 0$$

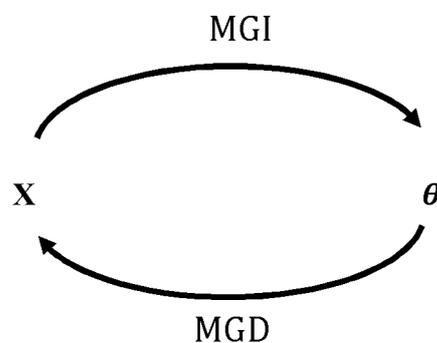
Équation de position :

$$\begin{cases} p_x = \cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ p_y = \sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ p_z = l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases}$$

Pour l'étude de l'orientation du bras, c'est à dire l'orientation du poigné et de la base par rapport au repère de base, on peut utiliser la méthode des angles d'Euler classique. Mais cette dernière n'est pas l'objectif de notre travail

II.7.2 Modèle géométrique inverse :

Le modèle géométrique direct MGD permet de calculer les coordonnées opérationnelles X en fonction des coordonnées articulaires θ :



Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires qui amènent l'organe terminal dans une situation désirée, spécifiée par ses coordonnées opérationnelles.

Il n'existe pas de méthode systématique d'inversion du modèle géométrique. Lorsqu'elle existe, la forme explicite issue d'une inversion mathématique, qui donne toutes les solutions possibles au problème inverse (il y a rarement unicité de la solution) constitue le modèle géométrique inverse. Il existe un certain nombre de méthodes pour calculer le modèle géométrique inverse, notamment la méthode de Paul qui traite séparément chaque cas particulier et qui convient pour la plupart des robots industriels.

Lorsque le modèle géométrique inverse n'existe pas, c'est-à-dire qu'il n'existe pas une forme explicite, on peut calculer une solution particulière du problème inverse par des procédures numériques, qui est une solution locale au sens où elle dépend des conditions initiales.[13]

Pour déterminer le MGI dans notre cas, on a opté pour des procédures numériques. Donc on peut utiliser les équations de position du modèle géométrique direct.

➤ calculer le θ_1 :

On a :

$$p_x = \cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3))$$

$$p_y = \sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 - l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3))$$

Une démarche analytique simple permet de déterminer θ_1 :

$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1$$

Au final, on obtient $\theta_1 = \arctan2(p_y, p_x)$.

➤ calcul de θ_2 et θ_3 :

- On a d'après notre configuration géométrique (les deux derniers corps du manipulateur C_1 et C_2) un système illustré par la figure ci-dessous :

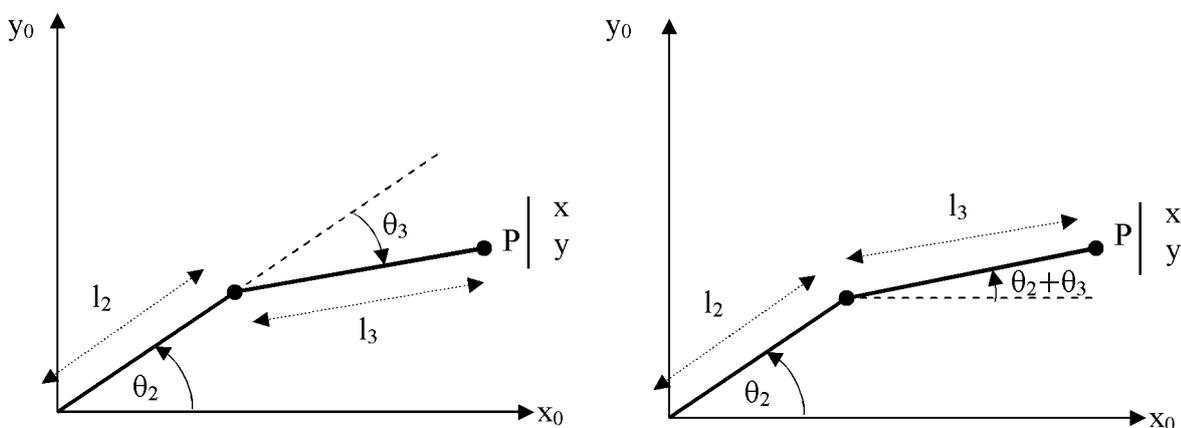


Figure II.19 : Géométrie des deux derniers segments

D'après la figure (II.19) on a le modèle géométrique direct suivant :

$$\begin{cases} x = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ y = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases}$$

Soit un système de 2 équations à 2 inconnues. Une démarche analytique procédant par substitution, permet de déterminer le modèle géométrique inverse.

- Rappelons le théorème de Pythagore :

$$a^2 = b^2 + c^2 + 2bc \cos(\alpha)$$

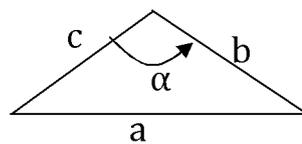


Figure II.20 : Application du théorème de Pythagore sur un triangle.

- Appliquons le théorème de Pythagore sur notre configuration géométrique :

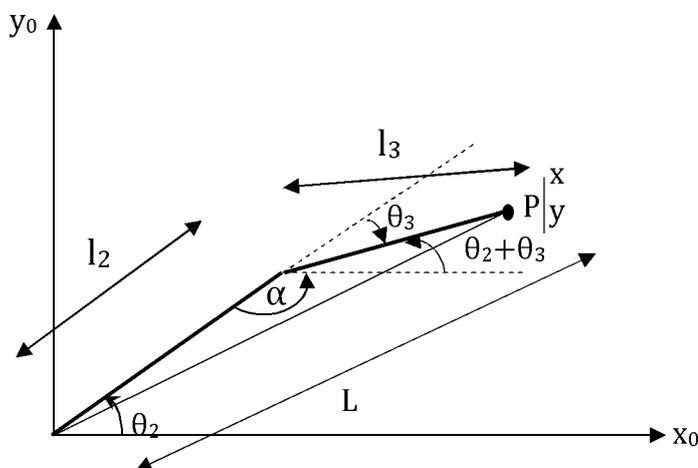


Figure II.21 : Application du théorème de Pythagore sur notre configuration géométrique.

D'après la figure (II.20), on a les équations suivantes :

$$L^2 = x^2 + y^2$$

$$L^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2 l_2 l_3 \cos \alpha . \quad \text{Avec } \alpha = \pi + \theta_3$$

D'où, on obtient :

$$x^2 + y^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos \alpha . \quad \text{On a } (\cos(\pi + \theta_3) = -\cos \theta_3)$$

On aura :

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \theta_3 \\ 2l_2l_3 \cos \theta_3 &= x^2 + y^2 - (l_2^2 + l_3^2) \end{aligned}$$

Au final on obtient :

$$\cos \theta_3 = \frac{x^2 + y^2 - (l_2^2 + l_3^2)}{2l_2l_3}$$

On aura :

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - (l_2^2 + l_3^2)}{2l_2l_3} \right)$$

Avec : $-1 \leq \frac{x^2 + y^2 - (l_2^2 + l_3^2)}{2l_2l_3} \leq 1$ pour que le point soit atteignable.

Si on développe les termes $\cos(\theta_2 + \theta_3)$ et $\sin(\theta_2 + \theta_3)$ dans les équations de x et y, on obtient :

$$\begin{cases} x = (l_2 + l_3 \cos \theta_3) \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \sin \theta_2 \\ y = l_3 \sin \theta_3 \cos \theta_2 + (l_2 + l_3 \cos \theta_3) \sin \theta_2 \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \cos(\theta_2 + \theta_3) &= \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) &= \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) \end{aligned}$$

Calculons le déterminant de ce système d'équations linéaires avec deux inconnues $\cos \theta_2$ et $\sin \theta_2$,

On a :

$$\begin{vmatrix} l_2 + l_3 \cos \theta_3 & -l_3 \sin \theta_3 \\ l_3 \sin \theta_3 & l_2 + l_3 \cos \theta_3 \end{vmatrix} = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \theta_3 = x^2 + y^2$$

Soit, via la méthode Cramer :

$$\cos \theta_2 = \frac{\begin{vmatrix} x & -l_3 \sin \theta_3 \\ y & l_2 + l_3 \cos \theta_3 \end{vmatrix}}{x^2 + y^2} \quad \text{Et} \quad \sin \theta_2 = \frac{\begin{vmatrix} l_2 + l_3 \cos \theta_3 & x \\ l_3 \sin \theta_3 & y \end{vmatrix}}{x^2 + y^2}$$

On aura :

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{1}{x^2 + y^2} (x(l_2 + l_3 \cos \theta_3) + y l_3 \sin \theta_3) \\ \sin \theta_2 &= \frac{1}{x^2 + y^2} (y(l_2 + l_3 \cos \theta_3) - x l_3 \sin \theta_3) \end{aligned}$$

Donc :

$$\theta_2 = \arctan2 \frac{y(l_2+l_3 \cos \theta_3)-xl_3 \sin \theta_3}{x(l_2+l_3 \cos \theta_3)+yl_3 \sin \theta_3}$$

Pour résumer ce système :

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan2 \left(\frac{py}{px} \right) \\ \theta_2 = \arctan2 \frac{y(l_2+l_3 \cos \theta_3)-xl_3 \sin \theta_3}{x(l_2+l_3 \cos \theta_3)+yl_3 \sin \theta_3} \\ \theta_3 = \arccos \left(\frac{x^2+y^2-(l_2^2+l_3^2)}{2l_2l_3} \right) \end{cases}$$

II.8 Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons acquis une bonne connaissance des bases de la géométrie en robotique ainsi que la modélisation géométrique des robots. Nous avons pu calculer le modèle géométrique direct et inverse propre à notre manipulateur, en utilisant la convention de Denavit-Hartenberg pour le modèle direct et en adoptant des procédures numériques pour le modèle inverse. Il nous reste maintenant à attaquer le côté pratique de notre projet, pour pouvoir utiliser une multitude de commandes sur le robot. Ce côté va être abordé dans le troisième chapitre qui est la partie la plus importante dans notre projet.

III.1 Introduction :

Après avoir passé en revue les différents types de bras manipulateurs existant et étudié leurs différentes structures mécaniques et géométriques, et en tenant compte d'un cahier des charges, nous nous sommes fixés l'objectif de concevoir un prototype d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté capable de se mouvoir dans son espace de travail et d'accomplir une tâche bien déterminée. Le schéma bloc d'un tel système est indiqué par la figure ci-dessous:

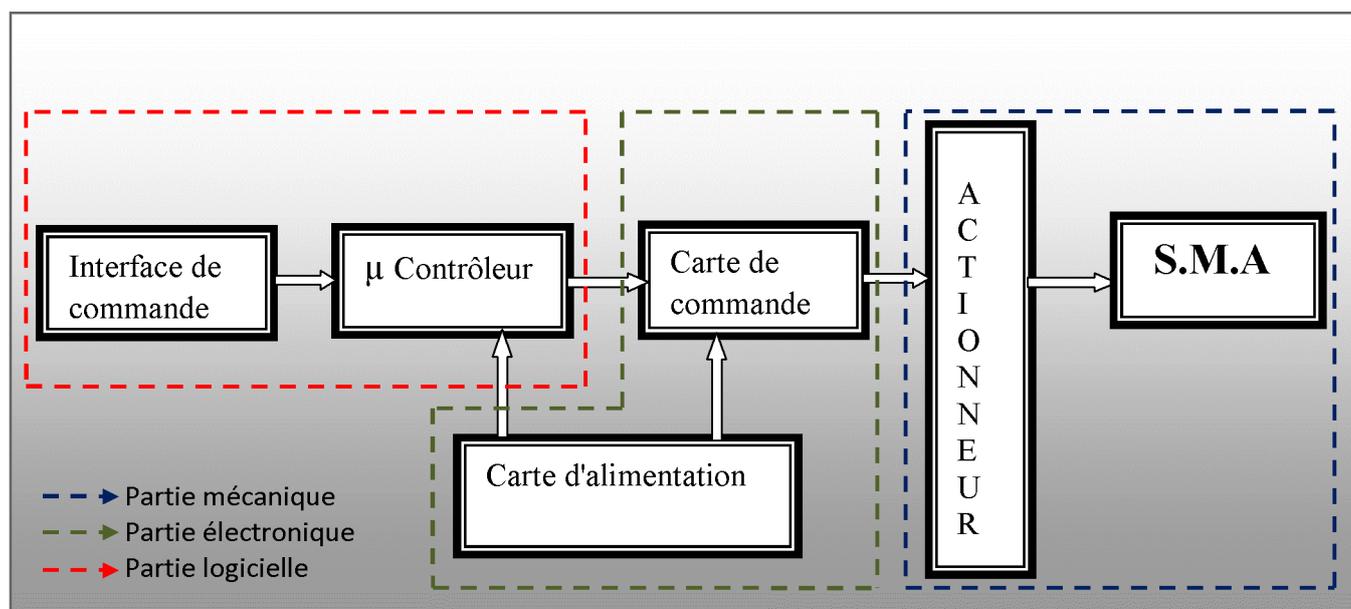


Figure III.1 : Schéma bloc du système

En étudiant et en examinant ce schéma bloc, plusieurs questions s'énoncent à nous qui sont les suivantes :

- quelle est la structure mécanique articulée (longueurs des porteurs, poids de la structure, couple utile, et matériaux utilisés) à choisir ?
- quel actionnement choisir pour faire mouvoir le système articulé ?
- quelle transmission ou type de commande utilisé pour commander le système ?

Afin de concevoir un tel système, on doit répondre à ces dernières.

III.2 Mise en œuvre:

Comme nous pouvons le remarquer ci-dessus, notre schéma se décompose en plusieurs parties, donc nous avons décidé de travailler en adoptant la méthode modulaire : le manipulateur sera décomposé en différentes parties liées les unes aux autres, cette vision des choses facilite grandement le travail. Bien que cela ait déjà été effectué dans le schéma bloc, procédons à un petit listing des parties qui devront être mises en œuvre au cours de cette conception:

- Partie mécanique : traite l'architecture et l'actionnement du manipulateur.
- Partie électronique : cette partie sera, comme son nom l'indique, chargée de l'étude des différents composants électroniques du manipulateur.
- Partie logicielle : chargée de la programmation.

III.3 Description de la structure mécanique articulée :

Tous les robots partagent les dispositifs d'une structure mécanique sous une certaine forme adéquate, qui est généralement une chaîne cinématique pour fonctionner d'appartenir au squelette d'un bras humain. Cette chaîne est constituée de segments, d'actionneurs et d'articulations qui sont reliés les uns aux autres afin de pouvoir exécuter une tâche bien déterminée.

Pour notre cas, nous avons pour but de concevoir un bras manipulateur qui sera constitué d'un chainage de trois segments portés par une base et liés entre eux par trois articulations rotatives comme le montre la figure suivante :

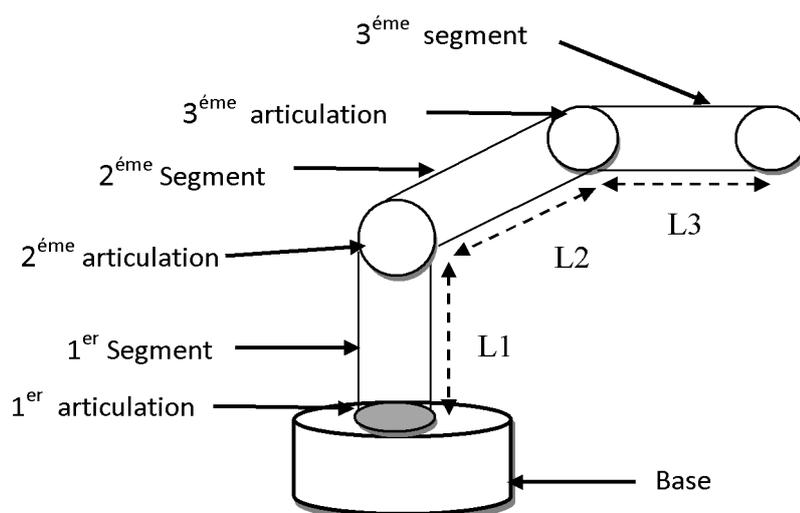


Figure III.2 : La structure mécanique articulée du manipulateur.

Une fois la structure mécanique à adopter est déterminée, une étude mécanique de cette dernière est nécessaire.

III.4 Etude mécanique du manipulateur :

Le premier point à traiter dans la conception d'un robot manipulateur est l'étude de sa structure mécanique ; les différents éléments à prendre en compte dans cette étude sont les suivants :

- Rigidité et résistance à la flexion du matériaux composant le bras.
- Poids de la charge à soulever.
- Poids et longueurs des différentes pièces composant le bras.
- Calcul des couples nécessaires pour faire mouvoir toute la structure.

III.4.1 Matériaux utilisés :

Lors de la conception d'un bras manipulateur, une étape importante à prendre en considération est le choix des matériaux. Ce dernier résulte d'une étude bien approfondie de certaines contraintes imposées, telles que le domaine d'utilisation du manipulateur, l'environnement de son opération, le poids maximal que peut avoir sa structure mécanique, etc...

Pour notre cas, nous avons opté pour l'Aluminium en raison de sa résistance à l'oxydation, sa faible densité qui est de 2.66 Kg.m^3 , sa rigidité, sa légèreté comparée à l'acier, sa disponibilité, sa facilité d'usinage et sa résistance à la flexion qui est de l'ordre de 70MPa , ces caractéristiques conviennent parfaitement à nos exigences.

III.4.2 Poids de la charge à soulever :

L'un des points à souligner dans cette étude est le poids des objets que le bras devra soulever. Nous voudrions que le bras puisse porter des objets assez légers adéquats à sa structure mécanique. Ainsi, en prenant une grande marge de sécurité, nous avons décidé de fixer la masse maximale des objets à porter à 500 grammes, soit un poids de 5N.

III.4.3 Poids de la pince :

La pince qui sera fixée sur ce manipulateur pèse 400g, ce qui correspond à un poids de 4N. (Cette pince est l'œuvre d'une étude d'un autre projet qui sera assemblé par la suite à ce manipulateur)

III.4.4 Poids des moteurs :

Les moteurs répartis sur le bras pèsent environ 200 grammes, le choix des moteurs n'a pas encore été fait puisque le but est justement de déterminer le couple nécessaire, donc ce poids n'est qu'une suggestion que nous essayerons de respecter lors du choix de ces derniers.

III.4.5 Poids et longueurs des segments du bras :

- 1) Longueurs des segments : Pour le choix des longueurs des segments du bras manipulateur, nous avons été confrontés aux deux faits suivants :
 - La surface délimitée par la pince du bras sera d'autant plus élargie, donc l'espace de travail sera plus important lorsque les segments seront plus longs.
 - La résolution du bras sera d'autant plus meilleure lorsque la longueur des segments sera plus petite.

De ce fait, nous avons décidé de choisir les longueurs suivantes :

- ✓ 1^{er} Segment : une longueur (L_1) de 10 cm
- ✓ 2^{ème} Segment : une longueur (L_2) de 20 cm
- ✓ 3^{ème} Segment : une longueur (L_3) de 20 cm

Ainsi, le bras possèdera une longueur d'environ 50 cm, longueur suffisante pour les besoins de notre application et qui répond parfaitement à nos exigences.

- 2) Poids des segments : Pour calculer le poids des différents segments de notre manipulateur on utilise la formule suivante :

$M = \text{épaisseur (mm)} \times \text{longueur (m)} \times \text{largeur(m)} \times \text{densité de l'Aluminium.}$

- Poids du 1^{er} Segment : $ms_1 = \text{ép (mm)} \times \text{long (m)} \times \text{larg (m)} \times dA$
 $= 1 \times 0.25 \times 0.08 \times 2.66 = 0.0995 \text{kg}$
- Poids du 2^{ème} Segment : $ms_2 = \text{ép (mm)} \times \text{long (m)} \times \text{larg (m)} \times dA$
 $= 1 \times 0.5 \times 0.08 \times 2.66 = 0.103 \text{kg}$
- Poids du 3^{ème} Segment : $ms_3 = \text{ép (mm)} \times \text{long (m)} \times \text{larg (m)} \times dA$
 $= 1 \times 0.5 \times 0.08 \times 2.66 = 0.103 \text{kg}$

III.4.6 Calcul des couples nécessaires :

Pour le calcul des différents couples nécessaires, on adopte le raisonnement suivant :

Considérons une tige de masse négligeable et de longueur « L » portant sur l'une de ses extrémités une charge de masse « m », l'ensemble peut être entraîné dans un mouvement de rotation par l'arbre d'un moteur fixé à l'autre extrémité figure(III.3).[15]

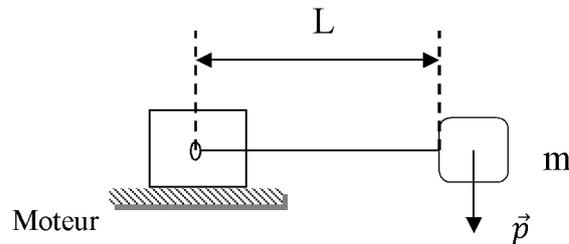


Figure III.3 : Structure mécanique

Pour maintenir la tige parallèle au sol (en équilibre), le moteur doit fournir un couple « C_{eq} » égale au moment de la force « p » due à la charge. Le couple nécessaire à fournir dans ce cas est donné par l'équation suivante : [15]

$$C_{eq} = | \vec{P} | \times L \quad \text{avec : } P = m \times g$$

On applique ce raisonnement à notre structure mécanique :

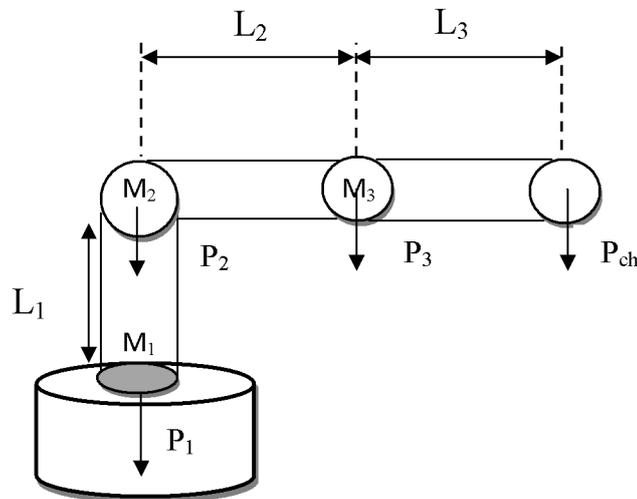


Figure III.4 : La structure mécanique articulée du manipulateur au repos

Pour calculer les couples appliqués sur les moteurs, nous avons décidé de considérer le cas extrême où les segments seront à l'horizontale. La valeur du couple ainsi obtenue est maximale.

- **Calcul du couple C_{eq3} nécessaire pour le moteur 3 portant le système (pince +charge +segment 3) :**

$$C_{eq3} = P_{ch} \times L_3$$

$$P_{ch} = m_3 \times g$$

$$m_3 = m_{ch} + m_{s3} + m_{pince}$$

P_{ch} : représente le poids (Newton)
 g : l'accélération de la pesanteur (10 m/s^2)
 m_{ch} : représente la masse de la charge (kg)
 m_{s3} : représente la masse du 3^{ème} segment (kg)
 m_{pince} : représente la masse de la pince (kg)

Application numérique :

$$m_3 = 0.5 + 0.4 + 0.1 = 1 \text{ kg}$$

$$P_{ch} = 1 \times 10 = 10 \text{ N}$$

$$C_{eq3} = 10 \times 20 = 200 \text{ N.cm.}$$

$$\Rightarrow \boxed{C_{eq3} = 20.39 \text{ kg.cm}}$$

- **Calcul du couple C_{eq2} nécessaire pour le moteur 2 portant le système (pince +charge +segment 3 +segment 2+moteur3) :**

$$C_{eq2} = P_{ch} \times (L_3 + L_2) + P_3 \times L_2$$

$$P_{ch} = m_3 \times g$$

$$m_3 = m_{ch} + m_{s3} + m_{pince}$$

$$P_3 = m_2 \times g$$

$$m_2 = m_{M3} + m_{s2}$$

P_3 : représente le poids (Newton)
 m_{M3} : représente la masse du 3^{ème} moteur (kg)
 m_{s2} : représente la masse du 2^{ème} segment (kg)

Application numérique :

$$m_2 = 0.2 + 0.1 = 0.3 \text{ kg}$$

$$P_3 = 0.3 \times 10 = 3 \text{ N}$$

$$C_{eq3} = 10 \times (20+20) + 3 \times 20 = 460 \text{ N.cm.}$$

$$\Rightarrow \boxed{C_{eq2} = 46.90 \text{ kg.cm}}$$

- Pour le calcul du couple C_{eq1} nécessaire pour le 1^{er} moteur, qui est appliqué sur le plateau rotatif est théoriquement nul (toutes les forces appliquées sur le servomoteur sont verticales), un couple du aux frottements est cependant nécessaire à appliquer. Malheureusement, nous ne pouvons chiffrer la valeur de ce couple, ce qui nous a induit à l'estimer au couple C_{eq3} (ce qui devrait suffire).
- Et on conclut que les moteurs requis doivent avoir un couple nettement supérieur aux couples calculés précédemment. Donc ce point va être traité dans ce qui suit.

III.5 Actionnement du manipulateur :

L'étude de la structure mécanique seule ne suffit pas. Le choix des actionneurs et leurs commandes est un point capitale dans cette conception. Ce dernier dépend de l'architecture du manipulateur et des performances désirées.

III.5.1 Choix des actionneurs :

Il existe différents types d'actionneurs utilisés dans la robotique tels que les actionneurs électriques, pneumatiques et hydrauliques, leur choix est une étape à bien étudier et à prendre en considération. Cependant, pour pouvoir valider un choix, il faut dans un premier temps déterminer avec précision le travail qui sera accompli par ces actionneurs, et il faut aussi connaître les performances à atteindre. Pour notre cas le choix le plus approprié est d'utiliser des servomoteurs en raison de :

- ✓ Le servomoteur facilite sa commande, vu qu'on peut commander l'arrêt, la marche, la vitesse et le sens de rotation du servomoteur à l'aide d'un seul fil.
- ✓ le servomoteur nous offre un couple important sous un volume réduit.
- ✓ L'architecture choisie nous impose non seulement la précision en position mais surtout la possibilité de maintenir cette position. Ainsi, le servomoteur nous offre cette précision voulue et son couple nous permet de la maintenir.

III.5.2 Présentation et caractéristiques générales d'un servomoteur : [16]

Un servomoteur est un « moteur intelligent » pouvant calculer de combien de degré il tourne. Il est très utile notamment dans la robotique. C'est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe. C'est un actionneur qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique comprenant :

- un moteur à courant continu de très petite taille
- un réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse mais augmentant le couple
- un potentiomètre qui génère une tension variable, proportionnelle à l'angle de l'axe de sortie
- un dispositif électronique d'asservissement
- un axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation.

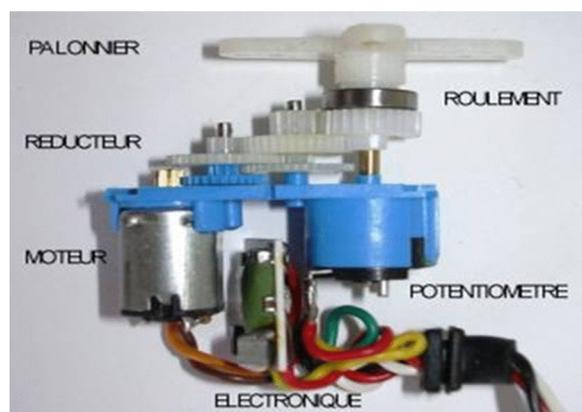


Figure III.5: Les différents composants d'un servomoteur

Un servomoteur est constitué de trois fils :

- Noir : masse
- Rouge : Vcc : 4,8 V à 7. 4V (suivant le couple voulu)
- Jaune : signal de commande

La couleur dépend du constructeur (FUTABA, HITEC, ...)

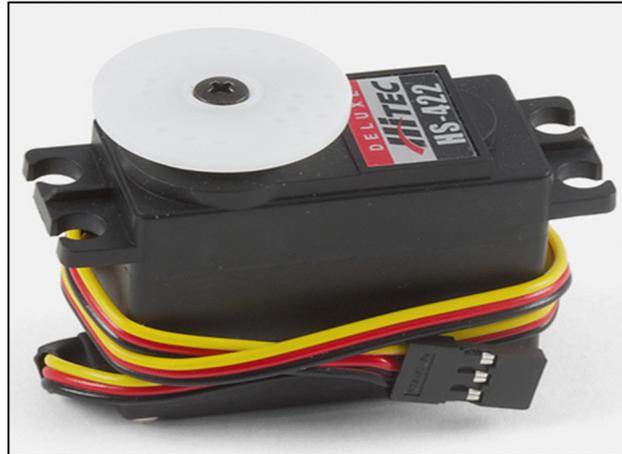


Figure III.6: Présentation d'un servomoteur

III.5.3 Fonctionnement :

Les servomoteurs sont commandés par l'intermédiaire d'un câble électrique à trois fils qui permet d'alimenter le moteur et de lui transmettre des consignes de position sous forme d'un signal codé en largeur d'impulsion plus communément appelé PWM, qui dispose cependant de deux caractéristiques indispensables pour que le servo puisse comprendre ce qu'on lui demande, à savoir une durée de répétition généralement fixée à 20 ms et la largeur d'impulsion qui détermine l'angle de rotation de l'axe de sortie. [17]

III.5.4 Le rôle de l'électronique et du potentiomètre :

Le servo utilise une électronique de commande qu'on peut nommer électronique d'asservissement, car c'est elle qui va gérer la position du bras du servomoteur. Cette électronique est constituée d'une zone de comparaison qui compare la position du bras du servo au signal de commande. Le deuxième élément qui constitue cette électronique est le capteur de position du bras. Ce capteur n'est autre qu'un potentiomètre couplé à l'axe du moteur. La mesure de la tension au point milieu de ce potentiomètre permet d'obtenir une tension image de l'angle d'orientation du bras. Cette position est ensuite comparée à la consigne (le signal de commande) qui est transmise au servomoteur. Après une rapide comparaison entre la consigne et la valeur réelle de position du bras, le servomoteur (du moins son électronique de commande) va appliquer une correction si le bras n'est pas orienté à l'angle imposé par la consigne. [18]

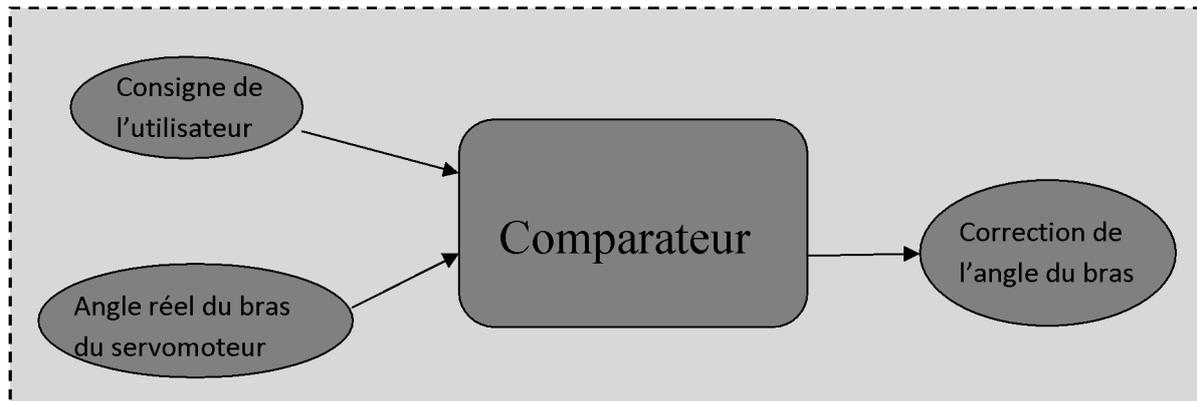


Figure III.7 : Fonctionnement du potentiomètre

III.5.5 Rôle du système réducteur :

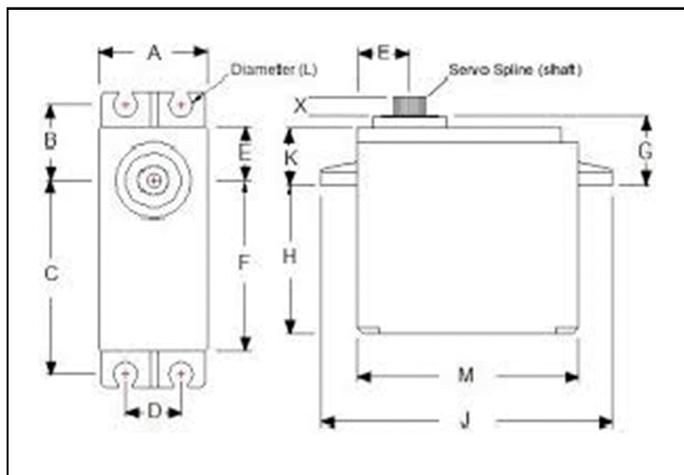
le servomoteur possède plusieurs pignons (engrenages) en sortie du petit moteur CC. Cet ensemble constitue le réducteur. Ce dernier fait deux choses : d'une part il réduit la vitesse de rotation en sortie de l'axe du servomoteur (et non du moteur CC), d'autre part il permet d'augmenter le couple en sortie du servomoteur .

III.5.6 Les servomoteurs utilisés :

Pour la réalisation de notre projet, nous avons opté pour des servo Hitec-HS-5765 de grande taille, et ce pour leur puissance importante. Ils développent un couple maximal de 25kg.cm , ce qui satisfait parfaitement nos exigences (adéquat avec nos calculs et le choix du dimensionnement fait auparavant). Donc nous allons utiliser quatre servomoteurs répartis comme suit :

- ✓ un servomoteur de couple $C_1 = 25 \text{ kg.cm} > C_{eq1}$ pour la rotation de la base et du segment verticale d'un angle entre 0° à 180° .
- ✓ deux servomoteurs de couple $C_2 = 50 \text{ kg.cm} > C_{eq2}$ pour faire articuler le 1^{er} segment horizontale d'un mouvement verticale
- ✓ un servomoteur de couple $C_3 = 25 \text{ kg.cm} > C_{eq3}$ pour faire mouvoir le 2^{ème} segment horizontale d'un mouvement verticale .

Ses dimensions sont montrées dans la figure ci-dessous :



- Ou :
- A=2.9mm
 - B=2.5mm
 - C=5mm
 - D=1.5mm
 - E=2mm
 - F=4.5mm
 - G=1.2mm
 - H=4mm
 - J=7.6mm
 - M=5.9mm
 - K=1.2mm
 - X=0.3mm

Figure III.8 : Les dimensions du servomoteur Hitec-5765MH

Ses caractéristiques techniques sont synthétisées dans le tableau suivant :

Système de contrôle	Contrôle par largeur d'impulsion, neutre à 1500µs
Impulsion requise	Signal carré de 3-5V crête à crête
Tension d'opération	6 volts- 7.4 volts
Courant de drainage	8mA au repos 830mA à 6V 960mA à 7.4V
Température de fonctionnement	-20 à +60 degrés C
Vitesse de fonctionnement	0.16sec/60° à 6V 0.13sec/60° à 7, 4V
Couple	20Kg. Cm à 6V 25Kg. Cm à 7.4V
Type de moteur	3 pôles Ferrite
Type de roulement	Double roulement à billes
Type d'engrenage	4 engrenages métalliques
Poids	172.3 g

III.6 La PWM:

Une fois le choix des moteurs est fait, l'étape qui suit c'est de les faire fonctionner ; donc de leur fournir une énergie électrique (tension) pour avoir une énergie mécanique (dans notre cas). Pour nos servomoteurs, on a choisit d'utiliser la commande en PWM.

III.6.1 Définition :

La PWM : Pulse Width Modulation en français appelée Modulation à Largeur d'Impulsion (MLI) est un signal numérique périodique de période 'T' caractérisé par la durée de l'impulsion 't_h' (pour laquelle la tension est celle de l'état haut) et d'un rapport cyclique (α) variable.

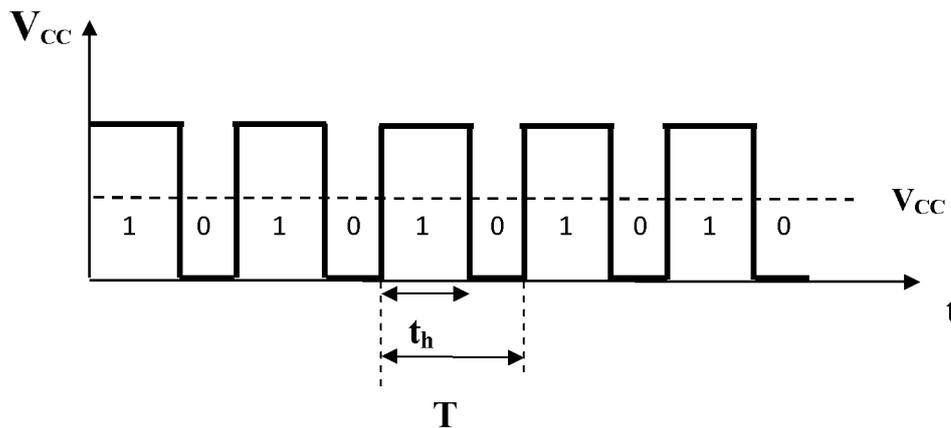


Figure III.9 : Signal PWM

Avec :

Le rapport cyclique α étant la proportion d'état haut par rapport au total du signal, s'exprime en % comme suit:

$$\alpha = 100 \times \frac{t_h}{T} .$$

- si $t_h = 0$ alors $\alpha = 0\%$. V_{moy} est nulle
- si $t_h = T$ alors $\alpha = 100\%$. V_{moy} est V_{CC} .

III.6.2 Intérêt de PWM pour les moteurs :

Le principal intérêt de la technique PWM est de limiter la chauffe des moteurs.

En PWM, la puissance fournie est soit maximale, soit nulle, il n'y a pas besoin de dissiper de puissance résiduelle. Un autre intérêt du PWM est que la tension appliquée au moteur pendant t_h est égale à V_{CC} . Celle-ci est suffisante pour vaincre les frottements et faire tourner le moteur.

III.6.3 Commande des servomoteurs en PWM:

Pour un servomoteur on parle de Signal code modulated signal (signal modulé en code d'impulsion) ou seule l'impulsion compte mais pas la fréquence.

En clair, il faut fournir au servo une impulsion à 1 (suivie d'un retour à 0), ce dernier va prendre en compte la largeur temporelle de cette dernière, qu'il va convertir proportionnellement en un angle.

La durée de l'impulsion est limité entre la valeur de 1ms au minimum et 2ms au maximum, soit entre 5% et 10% de la durée totale.

Le signal généré doit avoir une fréquence fixe de 50 Hz. Autrement dit, le temps séparant deux fronts montants est de 20 ms.

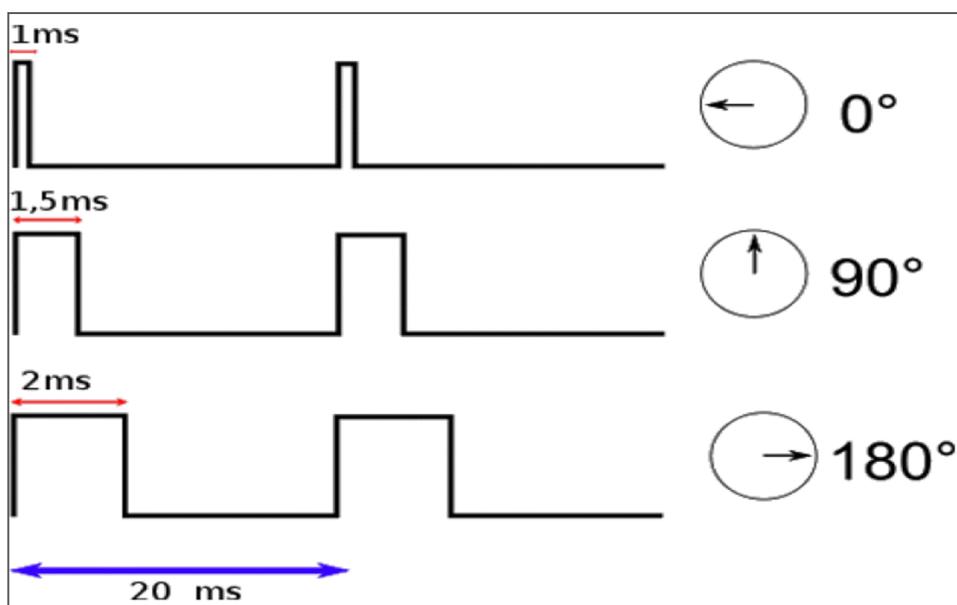


Figure III.10 : Relation PWM et angle résultant pour un débattement de 0° à 180°

III.7 Carte de commande :

A ce stade , on dispose d'une structure mécanique articulée qu'on doit commander. la carte de commande doit être polyvalente, de façon à permettre le fonctionnement du robot manipulateur d'une manière simple (programmation) et intuitive (compréhension du fonctionnement). Pour ce, nous avons choisis une carte de commande Arduino qui répond à nos exigences.

III.7.1 Arduino :

Arduino est un projet créé par des passionnés en Italie (2005) pour des étudiants. C'est une plate forme open-source d'électronique programmée qui est basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR) et un logiciel qui est un véritable environnement de développement intégré pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur.

Arduino peut être utilisé pour développer des objets interactifs, pouvant recevoir des entrées d'une grande variété d'interrupteurs ou de capteurs et pouvant contrôler une grande variété d'actionneurs, moteurs ou toutes autres sorties matérielles.

L'originalité de ce projet tient dans le fait que l'Arduino seul ne peut exécuter qu'un nombre limité de choses, mais en lui ajoutant des modules les possibilités offertes deviennent infinies.[19]

III.7.2 Pourquoi Arduino :

- ✓ Pas cher : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.
- ✓ Multiplate-formes : le logiciel Arduino écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- ✓ un environnement de programmation clair et simple : l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- ✓ logiciel Open Source et extensible : le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
- ✓ matériel Open source et extensible : les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, etc... Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dans le but de comprendre comment elle fonctionne.

III.7.3 Le principe de fonctionnement d'Arduino :

Les différentes versions des Arduino fonctionnent sous le même principe général:

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution de programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome
8. On vérifie que notre montage fonctionne.

III.7.4 La carte Arduino Uno :

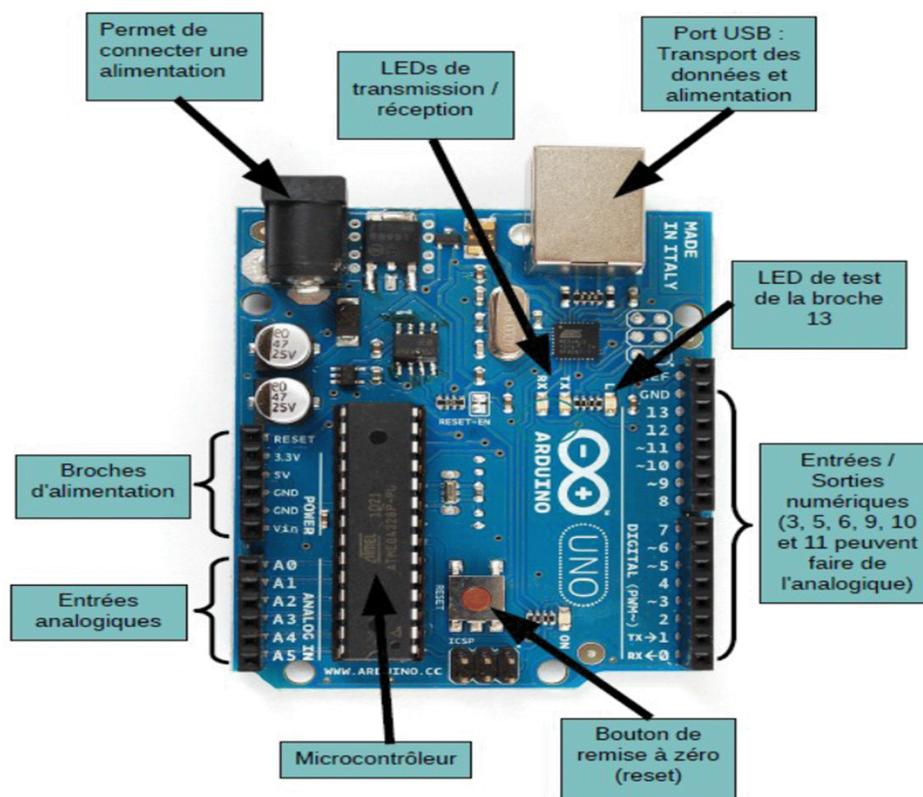
Des cartes Arduino il en existe beaucoup ! Peut-être une centaine, toutes différentes les une des autres ; parmi elles et les plus utilisées sont les cartes Mega ,Uno , Duemilanove,Leonardo, NANO et la carte Mega Adk.

Pour notre projet, nous avons choisis d'utiliser la carte portant le nom de « Uno » en raison de sa simplicité de fonctionnement ; dans ce qui suit, nous allons présenter ses caractéristiques ainsi que son fonctionnement.

Une carte Arduino Uno est composée de deux choses principales, qui sont : le matériel et le logiciel. Avec ces deux outils réunis, il nous sera possible de faire n'importe quelle réalisation.

III.7.4.1 Présentation du matériel: Il s'agit d'une carte électronique sous forme d'un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d'époxy ou de fibre de verre. Elle possède des pistes électriques disposées sur une, deux ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées. Cette carte est basée autour d'un microcontrôleur Atmega du fabricant Atmel de référence ATMega328.

L'ATMega328 est un microcontrôleur de 8 bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. La figure ci dessous nous montre ses différents composants.[20]



FigureIII.11 : Préstation de la carte arduino Uno .

Cette carte dispose de :

- 14 broches numériques (fonctionnant en 5V) peuvent être utilisées comme entrée numérique ou comme sortie numérique. Certaines d'entre elles peuvent avoir d'autres fonctions :
 - MLI ou PWM (broches avec le symbole "~")
 - DEL 13 (une DEL est incluse sur la carte et connectée à la broche 13)
 - interruption (broches 2 et 3)
 - communication série (broches 0 et 1) etc.
- 6 entrées analogiques permettent de convertir une tension analogique V_e de 0 à 5 V en une valeur numérique N (en décimale) d'une résolution de 10 bits (1024 niveaux).
 - Si $V_e = 0V$ on lit $N = 0$
 - Si $V_e = 5 V$ on lit $N = 1023$
- La carte peut être alimentée directement par la connexion USB ou par une alimentation externe.
- connecteurs de puissance :
 - 5V : tension régulée par la carte
 - 3,3V : tension régulée par la carte
 - V_{in} : tension issue de l'alimentation externe de 7/12V
 - GND : la masse
- d'un quartz 16Mhz,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit") et,
- d'un bouton de réinitialisation (reset).

III.7.4.2 Présentation du logiciel: Le logiciel open source (Windows, Linux ou Mac) fourni avec l'Arduino est un éditeur de texte qui permet :

- de programmer la carte en utilisant un langage simple proche du C
- de communiquer avec la carte grâce au "terminal série" (faire apparaître des informations de la carte sur l'écran de l'ordinateur)

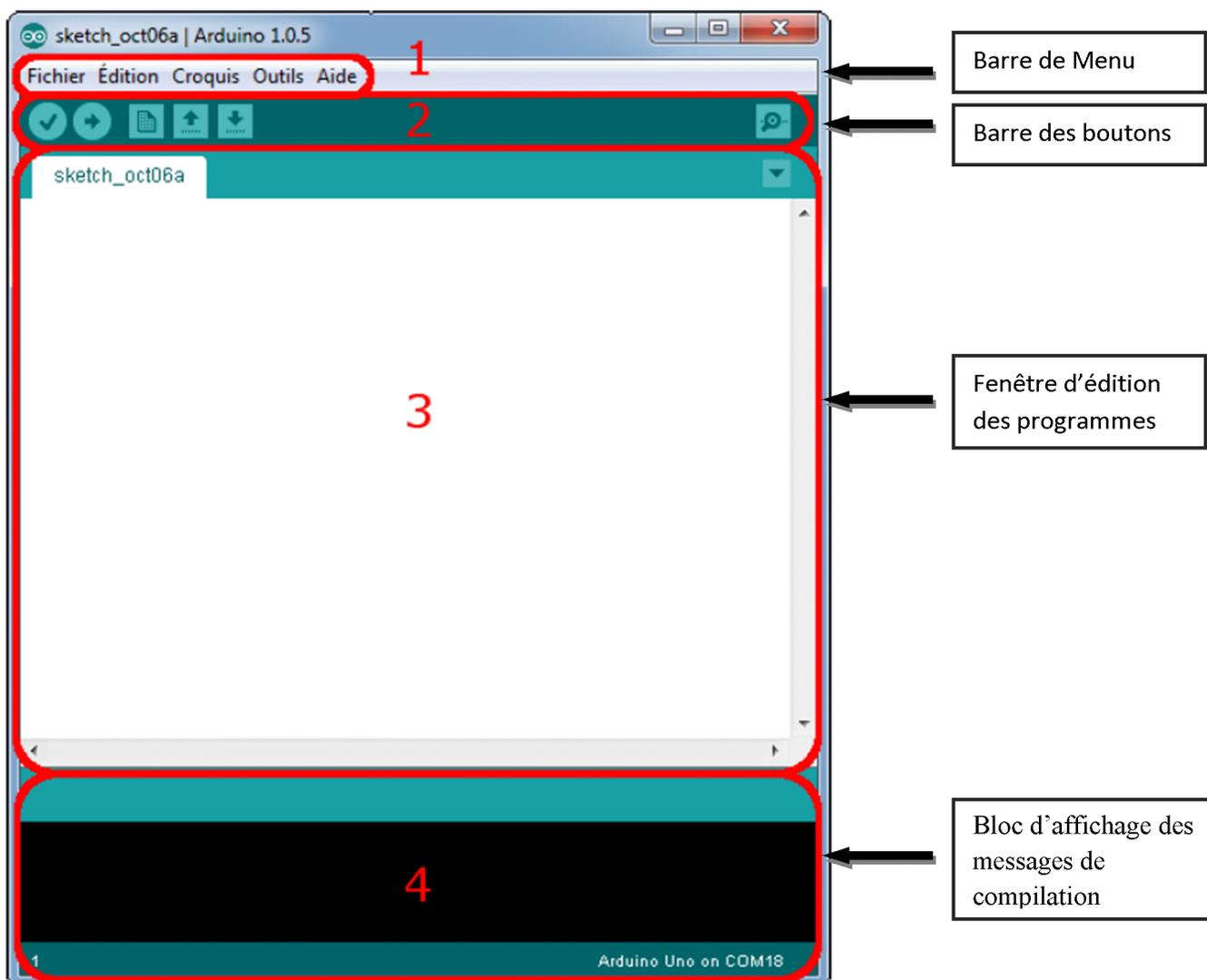


Figure III.12 : Logiciel Arduino

Correspondance :

- Barre de Menu (1) : elle contient les options de configuration du logiciel.
- Fenêtre d'édition (2) des programmes : ce bloc contient le programme créé.
- Bloc d'affichage des messages de compilation (3) : celui ci est important, car il aide à corriger les fautes présentes dans le programme. C'est le débogueur.
- Barre des boutons (4) : elle contient les boutons qui serviront lors de la programmation des cartes.

La figure ci-dessous nous montre les différents boutons du logiciel

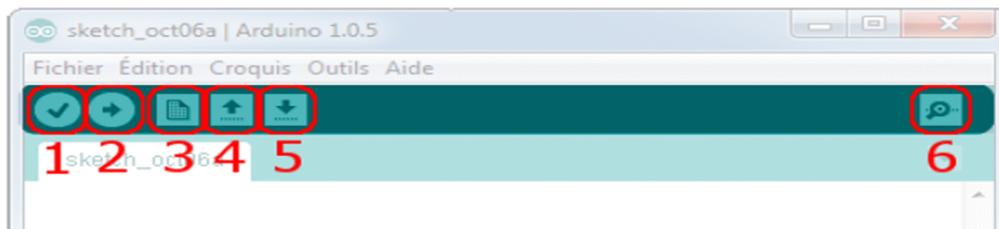


Figure III.13 : Barre des boutons du logiciel Arduino

Bouton1: Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans le programme.

Bouton 2 : Charge (téléverse) le programme dans la carte Arduino.

Bouton 3 : Crée un nouveau fichier.

Bouton 4 : Ouvre un fichier.

Bouton 5 : Enregistre le fichier.

Bouton 6 : Ouvre le moniteur série.

III.7.5 Programmation sur Arduino :

Le langage Arduino est très proche du C. Le contenu du programme, donc le programme en lui-même est ce qui va définir chaque action que va exécuter la carte Arduino. Mais ce n'est pas tout ! Dans le programme, il y'a plusieurs zones, qui ont chacune un rôle particulier.

- La première zone sert principalement à la déclaration d'informations propres au programme et les garder en mémoire, comme par exemple la déclaration des variables et des constantes.
- La zone secondaire sert à l'initialisation de certains paramètres du programme.
- La dernière zone est la zone principale où se déroule le programme. Tout ce qui va être écrit dans cette zone sera exécuté par la carte, se sont les actions que la carte exécutera.

III.7.6 Arduino et la PWM et les servomoteurs :

Comme nous l'avons vu auparavant, la carte Arduino Uno est basée sur microcontrôleur (ATmega328) qui permet de créer des signaux de PWM qui nous facilitent la commande des servomoteurs. Et pour ce fait la fonction "analogWrite (pin_pwm, nombre entre 0 et 255) " a été intégrée . Elle prend deux arguments :

- Le premier est le numéro de la broche numérique où l'on veut générer la PWM.
- Le second argument représente la valeur du rapport cyclique à appliquer.

Mais commander un servomoteur avec cette instruction n'est pas recommandé du fait que :

- La PWM générée avec analogWrite à une fréquence de découpage de 490Hz, et pour piloter un servo, il faudrait une fréquence de 50Hz. (c'est assez compliqué de modifier la fréquence d'un Arduino cela peut empiéter sur d'autres fonctions).[21]
- Comme nous le savons, un servo n'utilise que 5% à 10% de la durée totale de la PWM, et avec analogWrite, on peut prendre 256 durées différentes entre 0% et 100% ; ça veut dire un peu moins de 13 valeurs entre 5% et 10% et c'est très peu quand on veut le piloter de 0° à 180° car il ne peut prendre que 13 valeurs d'angles différents. [21]

Pour y remédier, une librairie <servo.h> a été développée .Elle permet de créer des signaux de commande du servomoteur sur n'importe quelle sortie digitale (sur les pins notés PWM :3, 5, 6, 9, 10 et 11, et sur les pins analogiques qui sont aussi des sorties digitales). Donc on peut commander jusqu'à 12 servos au même temps avec une carte Arduino Uno ; cependant le problème d'alimentation reste à régler.

III.8 Gestion de l'alimentation de la carte Arduino et des servomoteurs :

III.8.1 Principe d'alimentation d'un servomoteur Hitec-HS-5765 :[21]

La tension d'alimentation de ce servo, doit être comprise entre 6V à 7.4V continus.

Ce servo associe :

- une motorisation de puissance qui va nécessiter une intensité de l'ordre de 8mA au repos à 960 mA fonctionnant sous 7.4V.
- une électronique de commande qui ne va nécessiter que 1mA.

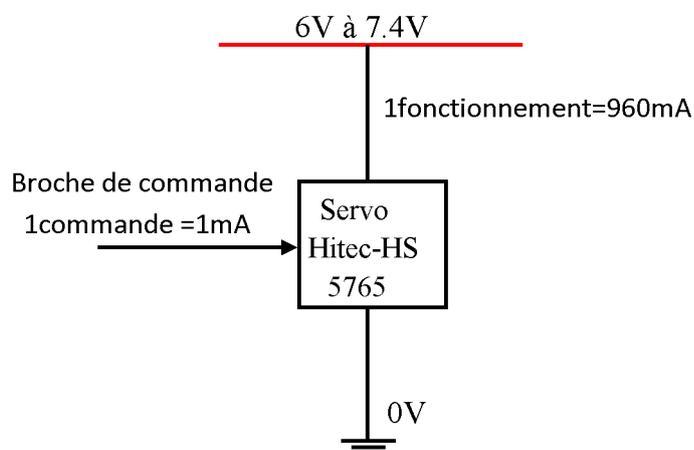


Figure III.14 : Principe d'alimentation d'un servomoteur

III.8.2 Principe d'alimentation d'une carte Arduino Uno :

On peut alimenter une carte de deux manières suivantes :

- via la connexion USB à 5V : l'intensité maximale fournie par la carte est de 500 mA, de 40 mA par broche et de 200 mA pour l'ensemble des broches.
- à l'aide d'une alimentation externe qui peut être soit un adaptateur secteur (pouvant fournir typiquement de 3V à 12V sous 500mA) ou des piles (ou des accus) de 6 à 20 volts.

Cependant, si la carte est alimentée avec moins de 7V, la broche 5V pourrait fournir moins de 5V et la carte pourrait être instable. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer et endommager la carte, ainsi la plage idéale recommandée pour alimenter la carte Uno est entre 7V et 12V.

Par conséquent :

- ✓ on pourra commander directement autant de servo que l'on veut avec une carte Arduino, le nombre maximale étant 200mA/1 commande, ce qui est largement suffisant pour commander nos quatre servos.
- ✓ On ne peut pas alimenter nos servos simultanément par l'alimentation 5V de la carte Arduino, vu que le nombre maximal étant 500mA/1 fonctionnement ; ce qui ne nous convient pas avec l'intensité de fonctionnement de nos servomoteurs (960 mA). Donc une alimentation externe sera indispensable.

De cette analyse, ressortent deux Tensions que le module d'alimentation doit fournir : 5V (Arduino) et 7.4V (Servomoteur).

Donc pour y remédier, nous avons donc décidé de nous procurer deux régulateurs dont chacun fournira une des deux Tensions requises :

- Régulateur LM 7805 pour obtenir une Tension de 5V.
- Régulateur LM 317 pour obtenir une Tension de 7.4V.

La Tension de base qui sera fournie à ces régulateurs sera une Tension de 12V issue d'une batterie ; donc la capacité est 1300 mA.

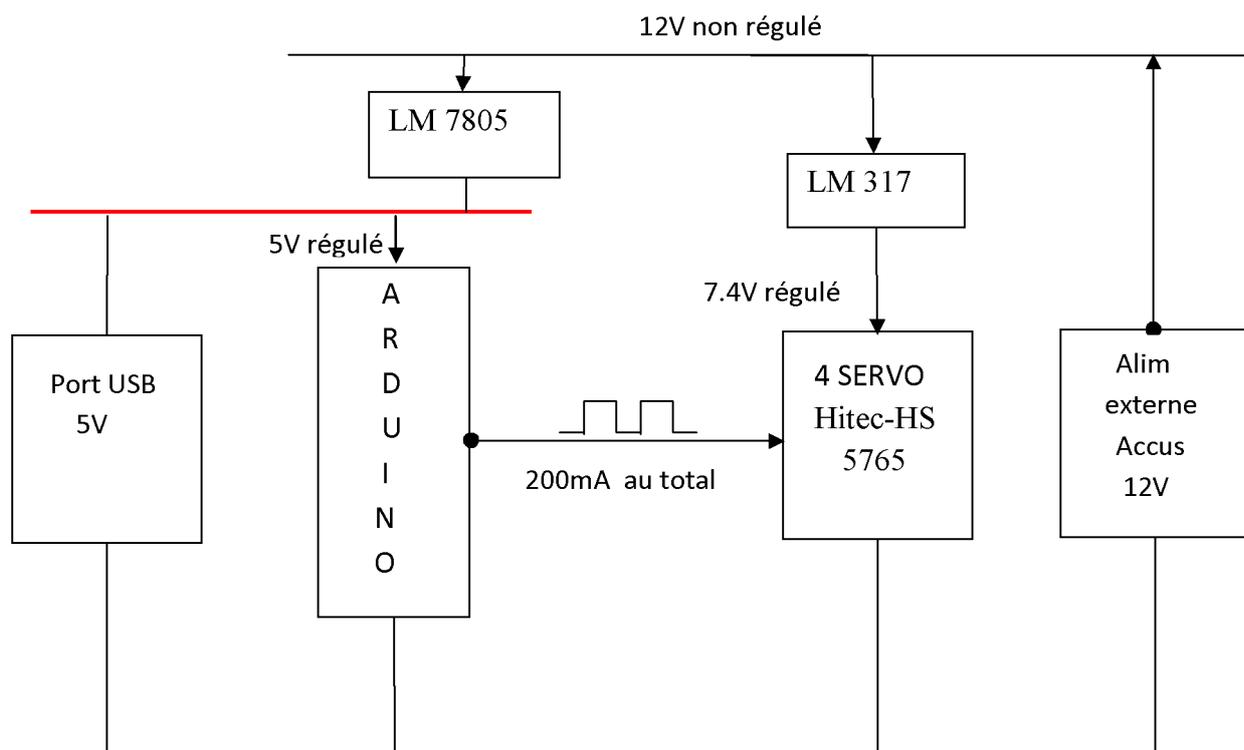


Figure III. 15 : Principe d'alimentation du manipulateur

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs parties ont été traitées. Premièrement, l'étude mécanique nous a permis de résoudre plusieurs contraintes telles que le choix de la structure mécanique à adopter, les matériaux utilisés, les couples nécessaires à fournir pour faire mouvoir tous le système, ainsi trouver les actionneurs adéquats à ces couples.

Par la suite dans la partie électronique, nous avons pu mettre en évidence certaines informations concernant la carte de commande Arduino en se basant sur son microcontrôleur qui est L'ATMega328.

Pour clôturer, nous avons tenté d'apporter une solution pour ce qui est de la gestion de l'alimentation de notre système.

Dans le chapitre suivant, nous allons essayer de mettre en œuvre tout ce qui a été discuté dans ce présent chapitre.

IV.1 Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté la structure générale de notre robot manipulateur et défini son propre modèle géométrique directe et inverse.

Nous avons pu répondre à toutes les contraintes rencontrées lors de sa conception ainsi validé tous les choix concernant sa mise en œuvre. Il est clair que la partie réalisation est très importante pour la coordination du fonctionnement de toutes les parties de notre projet.

Ce chapitre inclut toutes les étapes utilisées pendant la pratique ainsi que l'application et la commande du robot.

IV.2 Les détails du montage :

- Le matériel nécessaire à la programmation et au contrôle de notre robot est :



4 x Servomoteurs Hitec-HS 5765



1x Arduino Uno



1x Alimentation externe

- L'espace de développement Arduino : pour éditer et programmer notre carte Arduino, et aussi compiler notre programme on utilise un PC relié par USB à l'Arduino.



Figure IV.1 : L'espace de développement Arduino

- Instructions de montage :

1. Chacune des 14 broches numériques de la carte UNO (numérotées de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique.

Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40 mA d'intensité.

La connexion d'un servomoteur sur un Arduino est donc simple, il faut :

- Connecter le fil noir à la masse
- Connecter le fil rouge à une source de tension.
- Connecter le fil jaune à une des sorties numériques.

Pour nos servomoteurs, nous allons donc utiliser les 4 broches numériques suivantes :

- La broche N° 3, pour la commande du servo de la base
- La broche N° 4 et N° 5 pour la commande des deux servo du 2^{ème} segment
- La broche N° 6 pour la commande du servo qui se situe sur le dernier segment.

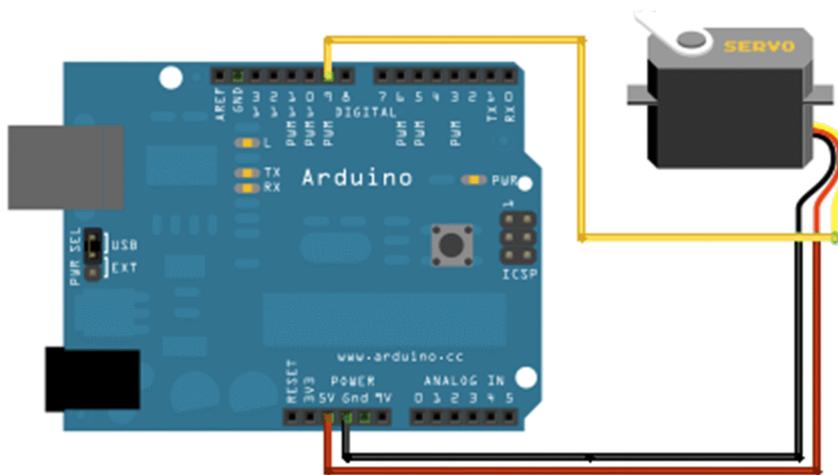


Figure IV.2 : Exemple de connexion d'un servomoteur sur un Arduino

2. Enficher la EasyCard broche à broche sur la carte Arduino : Pour des raisons de simplicité du montage et afin d'avoir un système non encombrant, nous avons décidé d'utiliser la carte EasyCard qui permet de disposer d'une connectique plus facile que celle qui se trouve sur la carte Arduino. Elle se fixe par-dessus en s'emboîtant dans les connecteurs de la carte Arduino.



Figure IV.3 : Enficher l'EasyCard sur la carte Arduino

- Le schéma théorique du montage :

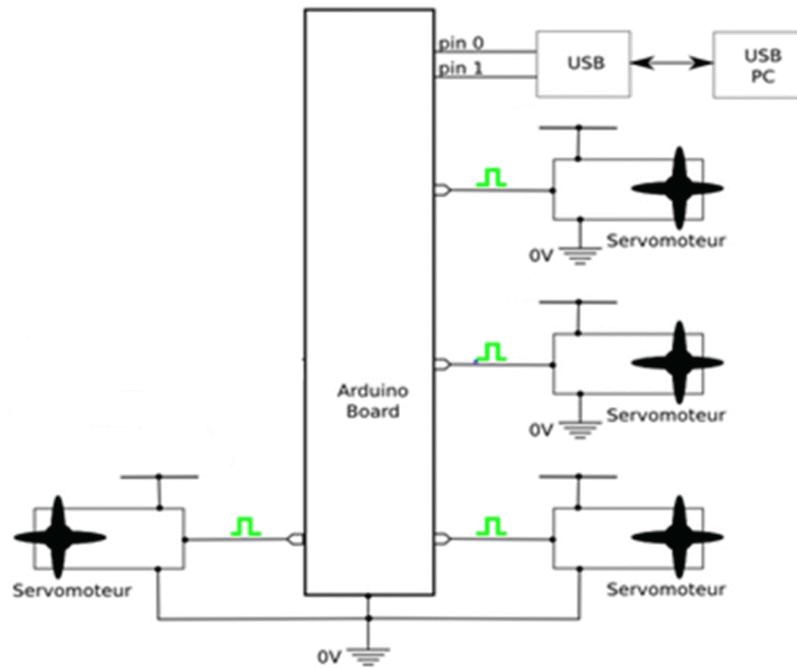


Figure IV.4: Le schéma théorique

- Le circuit du montage :



Figure IV.5 : Le montage final

IV.3 Partie programmation :

1. Présentation :

Notre programme permet de contrôler le bras articulé à 4 servomoteurs (1 servo base tournante, 3 servos de flexion) par réception des chaînes de caractères en provenance du Terminal Série via le port série USB de la carte Arduino. Ainsi, les quatre servomoteurs connectés à la carte Arduino sont contrôlés à partir du PC.

Donc le contrôle du bras articulé à 4 servomoteurs se fait par des chaînes de caractères avec des formes bien précises reçues sur le port série et décodées par le programme Arduino, ces dernières s'énoncent comme suit :

- `reset ()` : réinitialise position initiale du bras.
- `servoI (xxx)` : positionnement d'un servomoteur à la valeur angle absolu.
- `servoIII (xxx, xxx, xxx)`: positionnement synchronisé en angle absolu.

Avec :

xxx : angle en degrés : trois chiffres obligatoires, par exemple pour 45° degrés on introduira (045) et pour 1° on introduira (001).

I: servoA, servoB, servoC, servoABC.

Ressources utiles associées à notre programme :

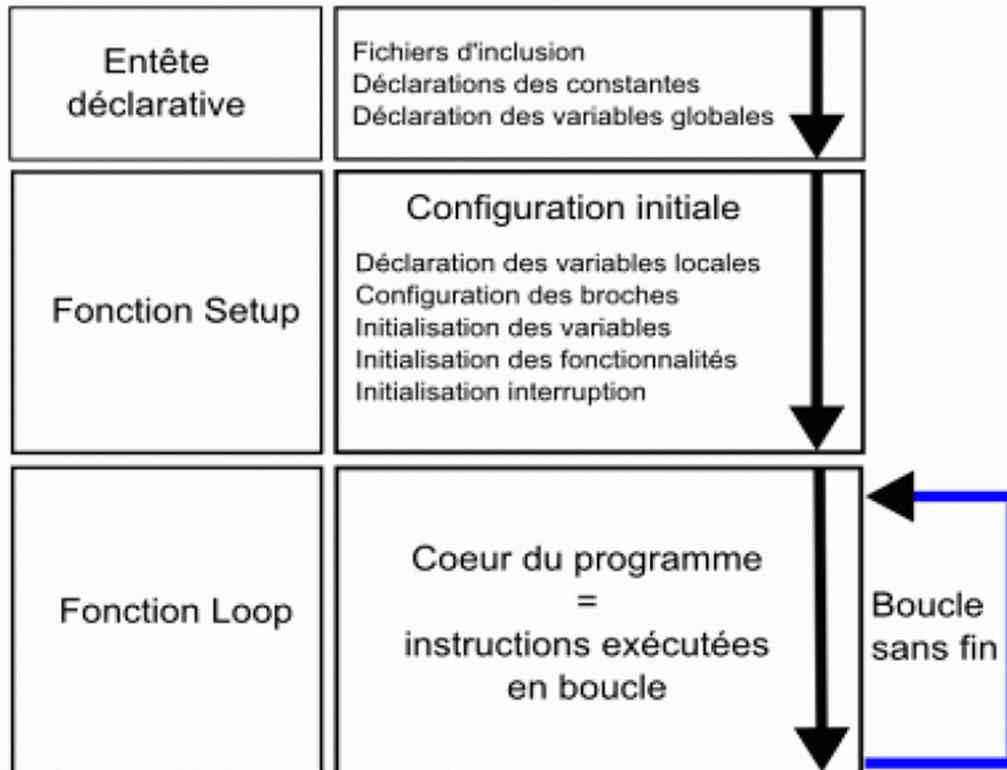
- La librairie Serial : pour les communications série entre la carte Arduino et l'ordinateur. Cet objet rassemble des informations (vitesse, bits de données, etc...) et des fonctions (envoi, lecture de réception, etc...) sur la voie série pour Arduino. Ainsi, on n'aura pas besoin de recréer tout le protocole et tous les détails ; d'où un gain fou en terme de temps et on évite les bugs.[18]
- La librairie Servo : pour contrôler les servomoteurs.

2. Structure et explication du programme :

- Explication du programme : Initialement les servo sont en état de repos ; lorsqu'une chaîne de caractère est reçue sur le Terminal, elle est analysée et si cette dernière correspond à une chaîne attendue, (elle correspond à l'une des chaînes éditées dans le programme) la fonction voulue de positionnement des servomoteurs est immédiatement exécutée.

Le programme comprend plusieurs fonctions de positionnement des servomoteurs :

- de façon progressive, un seul angle est reçu à la fois.
 - de façon synchronisée, plusieurs angles sont reçus à la fois et sont affectés à chaque servo de façon synchronisée.
- Structure du programme : la structure de notre programme et montre pas la Figure(IV.6)



FigureIV.6: Structure du programme

- **Au niveau de la partie déclarative :**

- ✓ Inclusion des bibliothèques utilisées: On inclut les bibliothèques des fonctionnalités utilisées, telle que la bibliothèque pour les servomoteurs.
- ✓ Déclaration de constantes utiles : On déclare les constantes utiles dans le programme telles que les constantes utiles pour les servomoteurs et constantes des broches E/S numériques.
- ✓ Déclaration des variables globales utilisées pour le positionnement des servomoteurs et des variables de stockage des valeurs reçues sur le port Série.
- ✓ Déclaration des objets utiles pour les fonctionnalités utilisées : Création objet servomoteur.

- **Au niveau de la fonction d'initialisation setup() :**

- ✓ Initialisation de la connexion série à 115200 bauds.
- ✓ Initialisation des fonctionnalités utilisées : Attacher les objets servo à leurs broches de commande.
- ✓ Configuration des broches en sortie.

- **Au niveau de la boucle principale, la fonction loop() :**

- ✓ Analyse de la chaîne reçue sur le port Série et extraction des valeurs des angles.
- ✓ Positionnement du servomoteur :
 - on transpose la valeur en degrés à l'aide de l'instruction constrain()
 - on positionne le servomoteur à l'aide de l'instruction write()
- ✓ Réinitialisation du positionnement initiale.

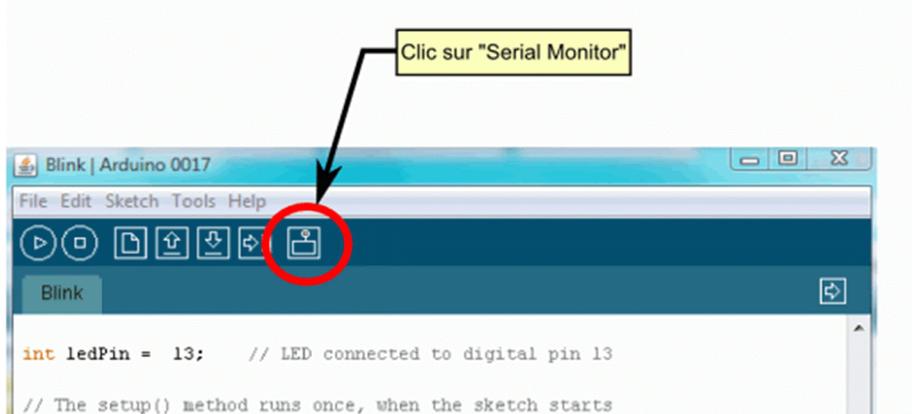
3. Présentation du Terminal Série :

Notre objectif est de communiquer des informations de la carte Arduino vers l'ordinateur et inversement. Pour ce faire, on adopte la communication série.

Cette dernière nous offre une façon simple et souple de faire communiquer l'Arduino avec un ordinateur ou d'autres périphériques. Dans cette partie nous allons expliquer comment envoyer et recevoir des informations grâce à cette fonctionnalité.

3.1. Préparation Terminal Série :

- Du côté de l'ordinateur : Un simple clic sur le bouton Moniteur Série.



Une nouvelle fenêtre s'ouvre à nous : c'est le terminal série :

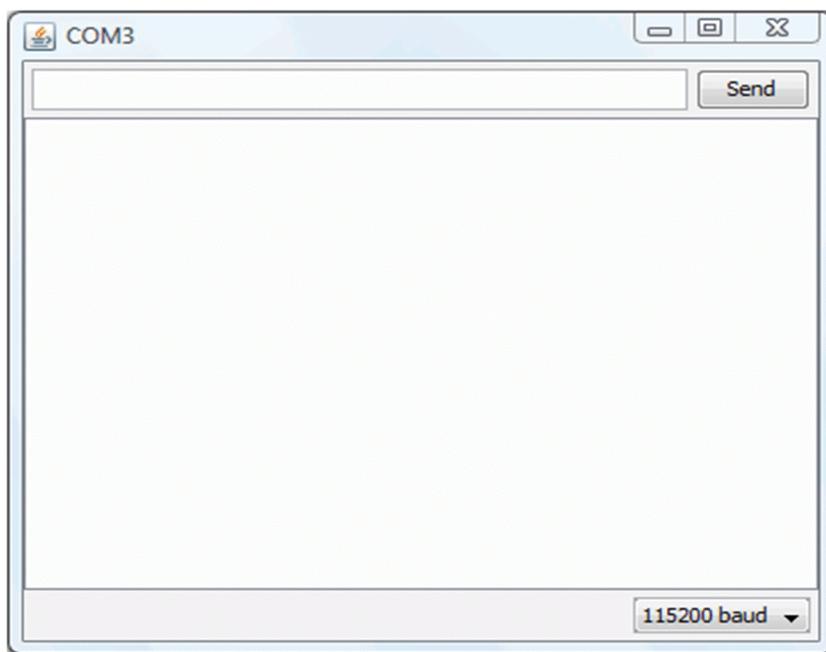


Figure IV.7 : La fenêtre du terminal série

Dans cette fenêtre, nous allons pouvoir envoyer des messages sur la voie série de l'ordinateur (qui est émulée par l'Arduino), recevoir les messages que l'Arduino nous envoie et régler deux à trois paramètres tels que la vitesse de transmission, la taille des caractères et le contrôle du flux sortant et entrant.

- Du côté du programme : Pour utiliser la voie série et communiquer avec notre ordinateur nous allons utiliser un objet (une sorte de variable mais plus évoluée) qui est intégré nativement dans l'ensemble Arduino : l'objet Serial.

Nous allons montrer les étapes d'implémentation de cet objet dans notre programme :

1. Création de l'objet Serial (=établissement d'une nouvelle communication série)
Avec la fonction : **Serial.begin()**.
2. Il faut alors régler le débit de communication sur la même valeur que nous allons programmer sur la carte Arduino et celle utilisée par le programme.
3. Envoie les chaînes sur la voie série.

L'objet Serial est muni d'un panel de fonctions qui lui sont propres. Cet objet est capable de réaliser ces fonctions, selon ce que le programme lui ordonne de faire.

3.2. Envoyer des données :

Le titre est piégeur, en effet, cela peut être l'Arduino qui envoie des données ou l'ordinateur. Mais pour notre cas, c'est l'ordinateur qui reçoit des données qui lui proviennent du programme.

Les fonctions que l'on va utiliser sont donc :

Print () : cette fonction permet d'envoyer des données sur la voie série. On peut par exemple envoyer un caractère, une chaîne de caractère, etc...[19]

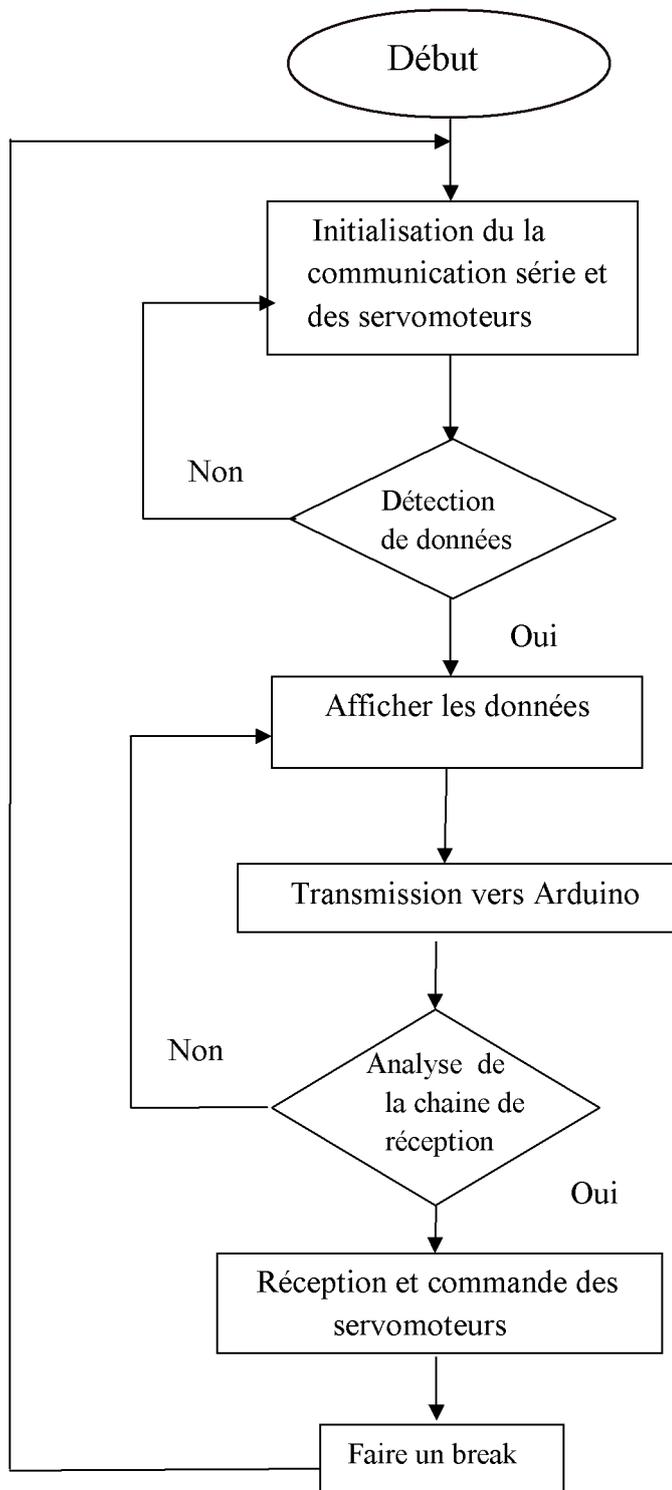
Println () : c'est la même fonction que la précédente, elle permet simplement un retour à la ligne, à la fin du message envoyé.[19]

3.3. Recevoir des données :

Cette fois, il s'agit de l'Arduino qui reçoit les données que nous allons transmettre à travers le terminal série. L'objet Serial dispose d'une fonction pour "écouter" la voie série afin de savoir si oui ou non il y a une communication de données. Pour vérifier si on a reçu des données, on va régulièrement interroger la carte pour lui demander si des données sont disponibles dans son buffer de réception. Un buffer est une zone mémoire permettant de stocker des données sur un cours instant.[18] Dans notre situation, cette mémoire est dédiée à la réception des différents angles de nos servomoteurs. Pour vérifier si des données sont arrivées, on utilise la fonction **available ()** de l'objet Serial. Cette fonction renvoie le nombre de caractères dans le buffer de réception de la voie série. Une fois que l'on sait qu'il y a des données, il faut aller les lire pour éventuellement en faire quelque chose. La lecture se fera tout simplement avec la fonction : **read ()**. Cette fonction renverra le premier caractère arrivé non traité. On accède donc caractère par caractère aux données reçues. Ce type de fonctionnement est appelé FIFO (First In First Out, premier arrivé, premier traité). [20]

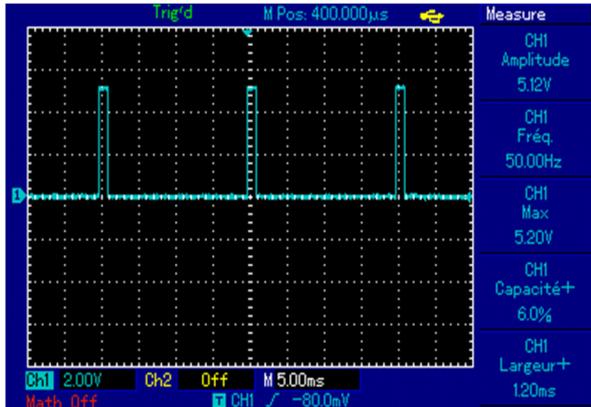
IV.4 Organigramme :

- Afin de résumer notre programme, un organigramme expliquant toutes les étapes que la carte Arduino effectue est donné comme suit :

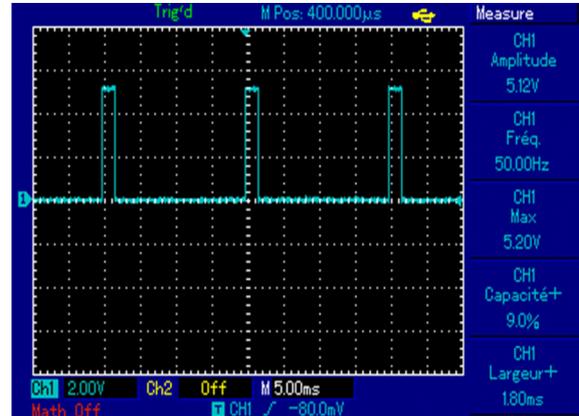


Tests de la commande PWM sur nos servomoteurs en utilisant notre programme:
 La chaîne de caractère transmise du terminal série vers l'Arduino est la suivante :
 servoABC (045, 150,080)

Pour $\theta = 45^\circ$:



Pour $\theta = 160^\circ$



Pour $\theta = 80^\circ$:

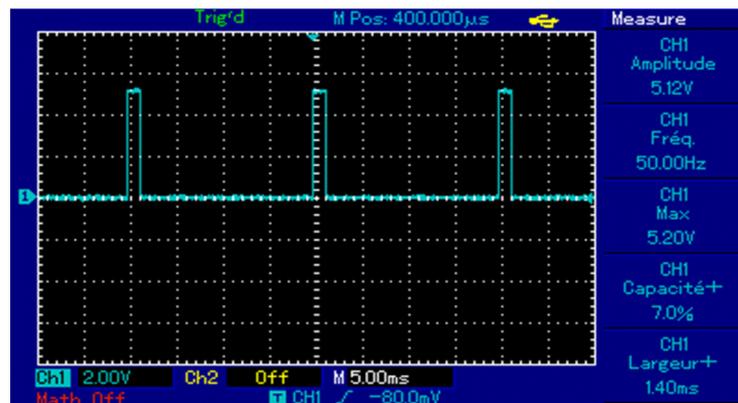


Figure IV.7: Les signaux PWM.

On remarque que pour :

- $\theta = 45^\circ$ on a obtenu un signal avec une largeur d'impulsion qui est égale à : 120ms
- $\theta = 160^\circ$ on a obtenu un signal avec une largeur d'impulsion qui est égale à : 180ms
- $\theta = 80^\circ$ on a obtenu un signal avec une largeur d'impulsion qui est égale à : 140ms.

Et on sait que la largeur de cette impulsion est entre : [1ms, 2ms] pour des angles variant entre $[0^\circ, 180^\circ]$, d'où on conclut que ces résultats concordent parfaitement avec ce concept.

Conclusion générale

Ce projet nous a permis de découvrir un domaine qui nous était méconnu, à savoir la robotique, ainsi que la mise en application de nos connaissances théoriques acquises tout au long de notre cursus de formation.

La conception de notre système nous a imposé le traitement de problème d'ordre mécanique, électronique et informatique ; ce qui nous a permis d'acquérir une certaine expérience et de nouvelles connaissances. Nous avons avant tout, appris à bâtir un projet en respectant un cahier des charges stricte, et ce par la construction d'une stratégie idée par idée jusqu'à maturité.

Un long travail a été nécessaire pour aboutir aux résultats mentionnés, car il a fallu imaginer un système en partant d'une idée personnelle. La mise en route a été relativement difficile car l'horizon était très flou, mais après s'être concerté et le fait d'avoir défini une ligne de conduite grâce à l'étude de système, nous avons pu nous fixer des objectifs et travailler afin d'y répondre de la meilleure façon possible.

Dans ce travail, nous avons pu préciser certaines notions fondamentales liées à la robotique en général. Ainsi, nous nous sommes consacrés à la définition de notions relatives aux robots manipulateurs pour une meilleure compréhension de notre système. Nous avons aussi élaboré le modèle géométrique direct et inverse propre à notre manipulateur.

Nous avons mis l'accent sur la partie conception, vu le rôle qu'elle joue dans notre projet ; elle nous a été d'un profit inestimable, que ce soit pour la partie mécanique, dans laquelle nous avons établi plusieurs résolutions telles que la structure mécanique, les matériaux utilisés, les couples nécessaires, ainsi que trouver les actionneurs adéquats à notre système ou pour la partie électronique, dans laquelle nous avons pu définir notre système de commande.

Parmi les perspectives envisagées à l'amélioration des performances du robot, nous proposons de :

- Faire une étude mécanique plus détaillée en utilisant des logiciels appropriés tel que Solid Works
- Remplacer le système de commande par un système embarqué, un ARM par exemple.
- Intégrer une commande par le neuro-flou.
- Rendre le système plus autonome en ajoutant différents capteurs comme par exemple des capteurs ultrasons pour la détection des objets, ou encore assister notre système par une vision artificielle.

En conclusion, nous espérons que ce modeste travail pourrait servir de référence aux Projets futures des prochaines promotions et les inciter à s'intéresser davantage au côté pratique de l'automatique.

Références bibliographiques

- [1]. Laetitia Matignon, «Introduction à la robotique », Licence 1ère année - 2011/2012
GREYC-CNRS Université de Caen, France.
- [2]. Juegouo Josiane, Mémoire: « Nouvelle méthode de génération des trajectoires pour la
commande de bras de robots ». Février 1994.
- [3]. Micheline Cayer, « Vocabulaire de la robotique classification et système mécanique »,
Edition EYROLLES, 1993.
- [4]. Coiffet. P, « Les Robots, tome 1 » Edition .Hermes, 1984.
- [5]. Micheline Cayer, « Vocabulaire de la robotique classification et système mécanique »,
Edition EYROLLES, 1993.
- [6]. P-Lopez, J-Numafoule, « Introduction à la robotique et notions de base ». Edition Test,
1992
- [7]. Jean-Louis Boimond Cours robotique, ISTIA, université Angers.
- [8]. H.Demouveau, « Initialisation à la modélisation et aux performances des robots ».
École d'ingénieurs Centre de recherche Mines des Douai. Année 2007-2008
- [9]. Jacques Gangloff, « Cours de Robotique ». ENSPS 3A MASTER ISTI
- [10]. A-Pruski, «Robotique générale », Edition Ellipse, 1988.
- [11]. T. Château, « Éléments de Robotique ».Université Blaise Pascal. .
- [12]. W.khalil, E.Dombre, «Modélisation, Identification et Commande de Robots »,
Éditions, 1988.
- [13]. W.Khalil, E.Dombre, «Bases de la modélisation et des robots de la commande robots-
manipulateurs de type série» Éditions Fondation unit, 08 mai 2012
- [14]. Gorla et B. Gorla et M. Renaud. « Modèles des Robots Manipulateurs application à
leur commande ». Éditions. 1984.
- [15]. <http://ira.dev.isib.be/2012/03/08/etude-mecanique-du-bras-2/>
- [16]. Simon Collin, Benjamin Courtel, Marie-Jeanne Hervo, « Bras Robotique ». Édition
2010/2011
- [17]. http://se2i.free.fr/pages/robotique/page_principe_servo.html
- [18]. Simon Landrault, Hippolyte Weisslinger, «Arduino : Premiers pas en informatique
embarquée». Édition du 19 juin 2014
- [19]. www.arduino.cc
- [20]. Nassimo BANZI, « Démarrez avec Arduino » 2013 102P
- [21]. www.mon-club-elect.fr

Résumé :

La robotique est un ensemble de disciplines et de techniques mécanique, électronique, automatique et informatique permettant la conception et la réalisation des machines automatique appellent « robot ».

La robotique a extrêmement progressé durant le siècle dernier, et ne cesse de progresser de jours en jours. Aujourd'hui ce terme est introduit dans divers domaines, et touche de nombreux secteurs de la vie.

L'objectif de cet article est de concevoir et de réaliser un prototype d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté capable de se mouvoir dans son espace de travail et d'accomplir une tâche bien déterminée commandée par une carte Arduino Uno.

Nous proposons également un ensemble de modèles géométriques qui vont faciliter le suivi des meilleurs chemins pour le robot manipulateur.

Mots clés :

Robotique, robot, bras manipulateur, modélisation géométrique, servomoteurs, carte de commande Arduino, terminal série, PWM.