

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème:**

**Commande et Réalisation d'un Robot Scara a  
4 degré de liberté**

Devant le jury composé de :

LABIOD CHOUAIB  
MOHREM ABDALKARIM  
MEZIANE ASSIA  
MILOUDI KHALED

Président  
Examineur  
Encadreur  
Rapporteur

Présenté par :

- Chaib Elhafnaoui
- Labbi Aymen
- Bilal Aya
- Tayeb Ghamam Hamed

**2021-2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciement**

**En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, notre créateur pour nous avoir donné la force physique et pouvoir mental pour accomplir ce travail.**

**Nous voudrions tout d'abord adresser toutes notre reconnaissance et à l'encadreur de ce mémoire monsieur Dr.Meziane Assia pour sa patience sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à augmenter à nos réflexion sa grande efficacité, la précision de ses informations et son soutien de près et de loin et leurs grandes compétences tout au long de cette période.**

**Nous tenons à remercier les membres de jury pour leur présence, pour leur lecteur attentif de notre mémoire ainsi que pour les remarques qu'ils nous ont afin d'améliorer notre travail nous voudrions exprimer notre gratitude.**

**Nous tenons à féliciter vivement le chef du département . Ainsi qu'à notre Université Echaahid Hama Lakhder El-oued Et tout le personnel administratif qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.**

**Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers l'enseignement de qualité dispensé par les professeurs a également sa nourrir nos réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle**

**Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes grâtes et respects.**

## **Dédicace**

**Je dédie ce mémoire à Mes parents**

**Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.**

**Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ;  
Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.**

**Un dédicace spécial pour Saleh Saadallah pou leur présent et leur touche dans ce mémoire merci Dr.Saleh**

**Sans oublier mes autres frères et sœurs.**

**Dédicace spéciale pour ma grande mère qu'elle aussi ma soutenue et conseillée.**

**A mes tantes, mes oncles et mes cousins.**

**A tout ceux que j'aime.**

**Bilal aya**

**Un cadeau à celui qui m'a ouvert le chemin de la connaissance après Dieu Tout-Puissant, à celui qui a apaisé les difficultés avec ses justes supplications. À ceux qui se tenaient à côté de moi et avaient le mérite après Dieu pour ce que j'ai atteint à mes parents, la grue, ma mère et mon père, que Dieu prolonge leur vie et m'accorde leur gentillesse et leur satisfaction À ceux qui m'ont aidé mes sœurs et frères Hussam, Musab et Ahmed Yassin, que Dieu les protège A tous mes amis et proches en Dieu, à mes professeurs Tous camarades de classe.**

Chaib elhafnaoui

**Je dédie ce travail à ma famille, qui m'a donné une éducation digne, et dont l'amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui : en particulier à mes parents, que Dieu prolonge leur vie, pour savourer l'effort qu'il a fait en moi de leur sévérité, et c'est ma profonde gratitude pour leur amour éternel, que ce rapport soit le plus beau cadeau que je puisse leur faire, je le dédie également à mes frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années scolaires, et à tous ceux qui nous ont aidés dans nos mémoires et dans notre parcours d'étude, de la part d'amis et de parents, même avec des conseils et des remerciements.**

**Labbi aymen.**

**Je dédie ce mémoire à Mes parents**

**Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien.**

**Mon père, Dr. Laid Ghemam Hamed qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.**

**Sans oublier mes autres frères et sœurs.**

**A mes tantes, mes oncles et mes cousins.**

**A tout ceux que j'aime.**

**Tayeb ghemam hamed**

**Résumé :** Dans tout système en robotique la mécanique et l'électronique sont liées, ceci se matérialisé par l'étude des actionneurs des chaines cinématiques associées et aussi par l'étude des capteurs qui constituent la source d'information.

Dans ce mémoire , nous avons traité le problème de modélisation Géométrique Direct , Inverse et le modèle Cinématique de robot Série SCARA à 4d.d.1 en suivant des procédures et des techniques qui ont abouti aux solutions pour les robots série .

Ainsi, réaliser et commander un bras manipulateur à 4 degrés de liberté en utilisant une carte Arduino.

**Mots-clés :** Robot manipulateur , Modélisation géométrique Direct et inverse, Denavit-Hartenberg ,Modèle Cinématique .

**Summary :** In any system in robotics, mechanics and electronics are linked, this is materialized by the study of the actuators of the associated kinematic chains and also by the study of the sensors which constitute the source of information.

In this memory, we treated the problem of modeling Geometric Direct, Inverse and the Kinematic model of robot Series SCARA with 4d.d.1 by following procedures and techniques which led to the solutions for the robots series.

Thus, making and controlling a manipulator arm with 4 degrees of freedom using an Arduino board.

**Keywords:** Manipulator robot , Direct and inverse geometric modeling, Denavit-Hartenberg , Kinematic model.

## ملخص

ان الأنظمة الروبوتية ترتبط ميكانيكيا والإلكترونيا ، ويتحقق ذلك من خلال دراسة مشغلات السلاسل الحركية المرتبطة بها وأيضاً من خلال دراسة المستشعرات التي تشكل مصدر المعلومات.

في هذه المذكرة عالجتنا مشكلة النمذجة الهندسية المباشرة المعكوسة والحركية لسلسلة الروبوت سكارا ذو اربعة درجات حرية باتباع الاجرات والتقنيات التي ادت الى حلول سلسلة الروبوتات ، وبالتالي تصميم ذراع مناوور لاربعة درجات من الحرية و التحكم فيه باستخدام لوحة الاردوينو وبرمجتها

الكلمات الرئيسية (المفتاحية): روبوت مناوور ، نمذجة هندسية مباشرة وعكسية ، Denavit-Hartenberg، نموذج حركي

## Liste des figures :

FIGURE I.1 CHAINE DE PRODUCTION ROBOTISÉE.....	3
FIGURE I.2 PARTIES COMMANDE- CONTRÔLE ET OPÉRATIVE D'UN ROBOT .....	4
FIGURE I.3 ROBOT HUMANOÏDE - ROBOT SÉRIE DE TYPE SCARA - ROBOT SÉRIE ANTHROPOMORPHE. ....	6
FIGURE I.4 FAUTEUIL ÉQUIPÉ D'UN BRAS- ROBOT CHIRURGICAL DÉAMBULATEUR//VERTICALISTE.....	6
FIGURE I.5 MAIN ARTICULÉE-ROBOT CHIEN-ROBOT HEXAPODE.....	6
FIGURE I.6 NOMENCLATURE DE ROBOT .....	7
FIGURE I.7 ROBOTS MOBILES.....	8
FIGURE I.8 ROBOT SOUS- MARIN.....	9
FIGURE I.9 ROBOT VOLANT .....	9
FIGURE I.10 ROBOTS INDUSTRIELS .....	10
FIGURE I.11 ROBOT DOMESTIQUE .....	10
FIGURE I.12 LE ROBOT MÉDICAL .....	11
FIGURE I.13 LA ROBOTIQUE MILITAIRE.....	12
FIGURE I.14. STRUCTURE D'UN ROBOT CARTÉSIEN. ....	12
FIGURE I.15. STRUCTURE D'UN ROBOT CYLINDRIQUE. ....	13
FIGURE I.16. STRUCTURE D'UN ROBOT SPHÉRIQUE. ....	13
FIGURE I.17. STRUCTURE D'UN ROBOT SCARA. ....	14
FIGURE I.18. STRUCTURE D'UN ROBOT 3R. ....	14
FIGURE I.19 UN BRAS MANIPULATEUR INDUSTRIEL.....	16
FIGURE I.20 STRUCTURE DE BARS MANIPULATEURS .....	17
FIGURE II. 1: ROBOT À STRUCTURE OUVERTE SIMPLE.....	21
FIGURE II.5 MODEL 3D D'UN ROBOT DE TYPE SCARA À 4DDL.....	33
FIGURE III.1 CRÉATION D'UN PROJET .....	32
FIGURE III.2 CONFIGURATIONS DE PROJET .....	33
FIGURE III.3 CIRCUIT DE PROJET SUR PROTEUS.....	33
FIGURE III.4. ORGANIGRAMME DES ÉTAPES DE LA SAISIE DES SCHÉMAS.....	34
FIGURE III.5 DÉFINISSONS NOTRE PROGRAMME.....	35
FIGURE III.6 DÉCLARER NOS ENTRÉES ET SORTIES (I/O).....	35
FIGURE III.7APPELEZ NOS MÉTHODES DANS LOOP().....	36

FIGURE III.8 ARDUINO UNO.....	37
TABLEAU.III.1. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES D'ARDUINO.....	38
FIGURE III.9 POTENTIOMÈTRE.....	39
TABLEAU III.2. PARAMÈTRES TECHNIQUES DES SERVOMOTEURS UTILISÉS. ....	40
FIGURE III.12. FILS DE CONNEXION. ....	40
FIGURE III.13 MONTAGE OUVERTE DE CE ROBOT.....	41

<b>REMERCIEMENT .....</b>	<b>1</b>
<b>DÉDICACE .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>2</b>

**CHAPITRE 01 : GÉNÉRALITÉ SUR LES ROBOTS .....** خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.

I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 HISTORIQUE .....	3
I.3 DÉFINITION .....	4
I.3.1. ROBOTIQUE.....	4
I.3.2. ROBOT .....	4
I.4. LES SYSTÈMES MÉCANIQUES ROBOTISÉ .....	5
I.5. CONSTITUANTS D'UN ROBOT .....	6
I.6. DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE ROBOTS.....	8
1.6.1 ROBOT MOBILE.....	8
1.6.2. ROBOT SOUS- MARINS .....	8
1.6.3. ROBOTS VOLANTS .....	9
1.6.4. LA ROBOTIQUE INDUSTRIELLE .....	9
1.6.5. LA ROBOTIQUE DOMESTIQUE .....	10
1.6.6. LE ROBOT MÉDICAL .....	10
1.6.7. LA ROBOTIQUE MILITAIRE .....	11
I.7. CLASSIFICATION GÉOMÉTRIQUE : .....	12
I.7.1. STRUCTURE CARTÉSIENNE (PPP) : .....	12
I.7.2. STRUCTURE CYLINDRIQUE (RPP) OU (PRP) : .....	13
I.7.3. STRUCTURE SPHÉRIQUE OU POLAIRE À AXE DE ROTATION ORTHOGONALE : .....	13
I.7.4. STRUCTURE DITE SCARA : .....	13
I.7.5. STRUCTURE 3R (ANTHROPOMORPHE) : .....	14
I.8. CARACTÉRISTIQUES D'UN ROBOT : .....	14
I.9. DOMAINES D'APPLICATION : .....	15
I.9.1. TÂCHES SIMPLES : .....	15
I.9.2. TÂCHES COMPLEXES : .....	15
I.10 LES BRAS MANIPULATEURS .....	15
I.10.1 DÉFINITION .....	15
I.10.2 STRUCTURE MÉCANIQUE DES BRAS MANIPULATEURS.....	16
<b>I.11 CONCLUSION</b>	

**CHAPITRE 02 : .....** خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.

**MODÉLISATION GÉOMÉTRIE DE ROBOT SCARA À 4D.D.L....** خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.

II.1 INTRODUCTION .....	19
II.2.1 DESCRIPTION GÉOMÉTRIQUE:.....	20

II.2 PARAMÉTRAGE DE DENAVIT-HARTENBERG :	21
II.3 MODÈLE GÉOMÉTRIQUE .....	24
II.3.1 MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DIRECT :	24
II.3.2 MODÈLE GÉOMÉTRIQUE INVERSE :	26
II.3.3 POSITION DU PROBLÈME :	27
II.3.4 PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE PAUL :	29
II.4 MODÉLISATION CINÉMATIQUE .....	31
II.4.1. MODÈLE CINÉMATIQUE DIRECT (MCD).....	31
II.4.2. MODÈLE CINÉMATIQUE INVERSE(MCI) .....	31
<b>II.5 CONCLUSION</b>	
<b>CHAPITRE 03 :           CONCEPTION ET RÉALISATION DU ROBOT SCARA A</b>	
<b>4 D.L.L</b> .....خطأ! الإشارة المرجعية غير معروفة.	
III.1. INTRODUCTION.....	32
III.2 PARTIE SIMULATION .....	32
III.2.1 Présentation du Proteus .....	32
III.2.2 Présentation des outils de la simulation.....	32
III.2.3 Création d'un projet.....	32
III.2.5 Circuit de projet sur Proteus .....	33
III.2.6 Etapes de création des schémas électriques :	34
III.3 CRÉATION D'UN PROGRAMME DE CE PROJET .....	34
III.4 RÉALISATION RÉELLE .....	36
III.4 .1Principe de fonctionnement.....	36
III.4.2 Matérielle utilisé dans ce projet.....	36
III.5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS :	42
<b>III.6CONCLUSION</b>	
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAPHE.....</b>	<b>45</b>



# Introduction générale

## Introduction générale

Lors de l'introduction des robots dans le début des années soixante, les robots étaient utilisés pour des opérations dangereuses, comme dans le cas des centrales nucléaires, ou les robots sont utilisés pour bloquer les fuites radioactives, le nettoyage et la décontamination des zones contaminées[I].

Aujourd'hui, nombreux sont les domaines pour lesquels la robotique est devenue un outil incontournable, les constructions navale et automobile, les grandes chaînes de montage... tant d'exemples qui nous viennent immédiatement à l'esprit, ce qui nous fait remarquer que le danger n'est toutefois pas la seule raison qui puisse rendre le robot intéressant, en effet, avec une précision grandissante l'industrie robotique occupe de plus en plus de place notamment dans les chirurgies modernes et les laboratoires médicaux qui requièrent des robots pour effectuer des tâches répétitives et précises[II].

A l'instar des autres disciplines, la robotique a vite fait intégré le numérique en vue de se mettre au diapason des autres sciences. Après avoir été commandés par différents moyens, les robots sont actuellement dans leur quasi-totalité commandés par ordinateur ce qu'ils leur vaut davantage de travaux de recherche[III].

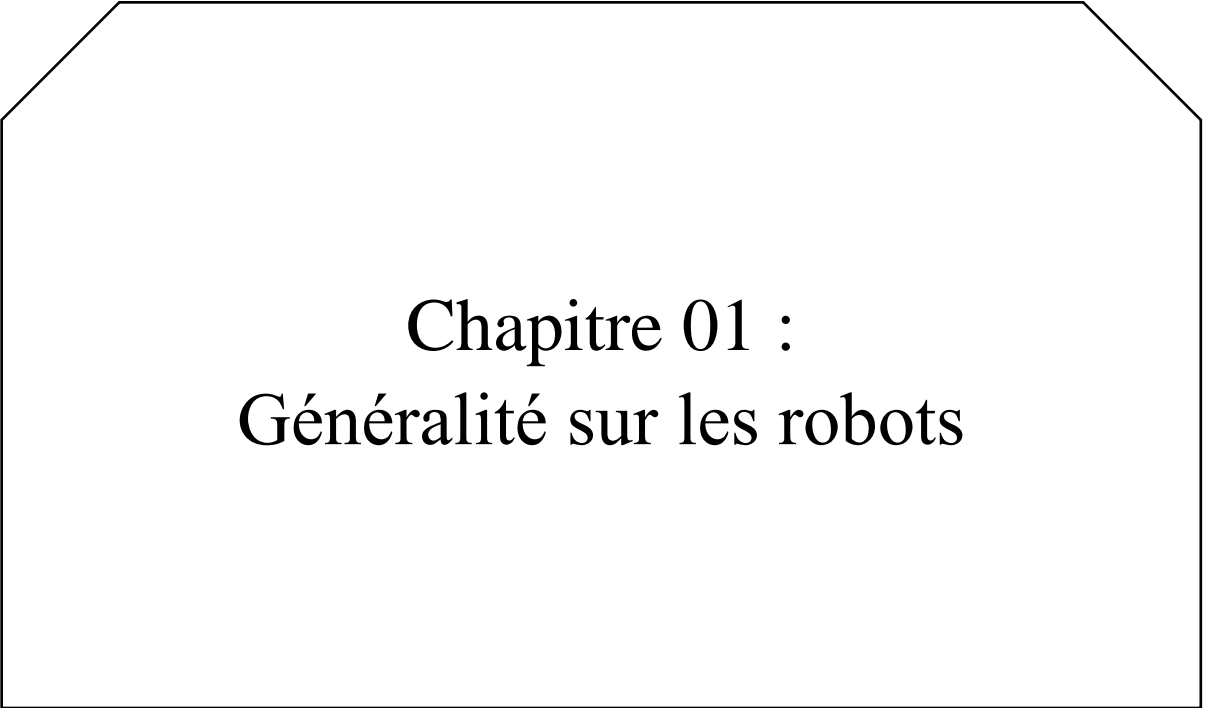
Notre domaine électromécanique est une combinaison entre les phénomènes électriques et mécaniques. Pour maîtriser ce domaine il faut d'abord connaître comment peut-on relier ces deux phénomènes, pour ce là nous sommes intéressés aux robots manipulateurs pour des applications en robotique industrielle où elle remplace les ouvriers dans les tâches pénibles, répétitives ou dangereuses (la peinture, le déplacement des objets, les microsoudures... etc.) . Pour maitre en évidence cette technique il faut adopter comme thématique du présent projet de fin d'étude ; une réalisation pratique d'un circuit électrique dans le but de commander électriquement un bras robotique autour d'une carte arduino.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- Le première chapitre est consacré à la généralités sur les robots mais avant de présenter quelques références importantes relatives aux robots série à 4 degrés de liberté ,nous commençons par rappeler quelques définitions de base .
- Dans le deuxième chapitre, à consacrés d'étudier le modèle géométrique direct et inverse et le modèle cinématique.

- Le chapitre troisième est dédiée de Conception et réalisation du robot scara a 4 d.1.1 et Interprétation des résultats

Ce mémoire se termine par une conclusion générale sur les travaux menés dans cette étude



**Chapitre 01 :**  
**Généralité sur les robots**

---

## I.1 Introduction

A l'origine des robots ont été conçus pour remplacer les travailleurs humains, qui souffraient de problèmes industriels à l'époque, on pensait que les robots seraient des machines universelles capables de la reprogrammation rapide pour une grande variété de tâches, et ces idées qui ont motivé leur développement. La robotique est un ensemble de disciplines techniques (mécanique, électronique, automatique, informatique) articulées autour d'un objectif et d'un objet commun. Cet objectif est l'automatisation flexible de nombreux secteurs de l'activité humaine réputés jusqu'à très récemment comme ne pouvant se passer de la présence de l'homme, et l'objet est le robot, sorte de machine universelle dont l'homme rêve depuis toujours (mais qui n'a pas encore la forme de ce rêve).

## I.2 Historique :

- 1920 : Apparition du mot robot : l'origine du mot est la langue tchèque dans laquelle son Ancêtre 'robota' signifie travail forcé. Il a été introduit, en 1920, par l'écrivain tchèque Karel Capek dans la pièce de théâtre Rossum's Universal Robots.
- 1961 : Unimation, le 1er robot industriel : descendant direct des télémanipulateurs développés pour les besoins du nucléaire. Il est vendu à partir de 1961 par la société American Unimation (devenu Staubli Unimation), crée par George Devol et Joseph Engelberg. Il est utilisé pour la première fois sur les lignes d'assemblage de General Motors. Ce robot, de 1,5 tonnes, était capable de manipuler des pièces de fonderie pesant 150 kg.
- 1972 : 1er chaîne de production robotisée : Nissan ouvre la première chaîne de production complétement robotisée, selon une étude l'IFR, 2142 de robots ont été fabriqués entre les années 60 et la fin 2010, [1]

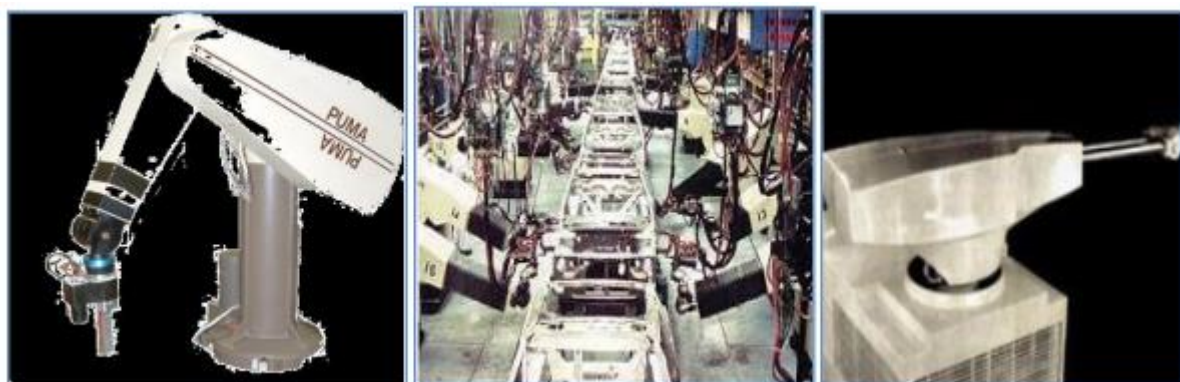


Figure I.1 Chaîne de production robotisée

- 1947 : premier manipulateur électrique télé opéré.
- 1954 : premier robot programmable.
- 1961 : apparition d'un robot sur chaîne de montage de général Motors
- 1961 : premier robot avec contrôle d'effort.
- 1963 : utilisation de la vision pour commander un robot.

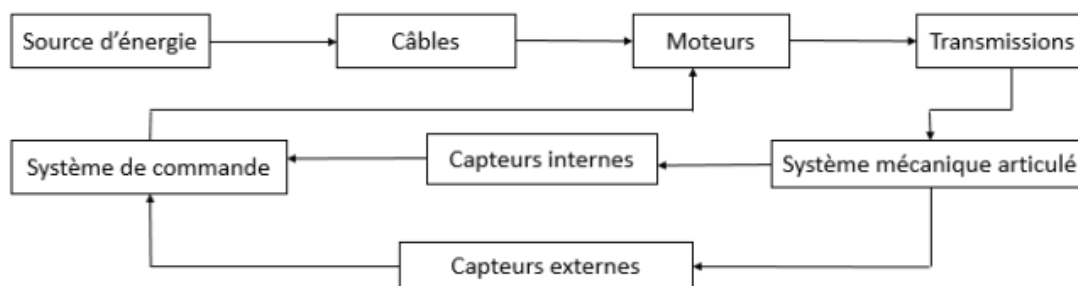
## I.3 Définition

### I.3.1. Robotique

Ensemble des domaines domestique scientifiques et industriels en rapport avec la Conception et la réalisation des robots.

### I.3.2. Robot

- ✓ Un robot est un système mécanique poly articulé mu par des actionneurs et commandé par un ordinateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches.
- ✓ Appareil automatique capable de manipuler des objets et exécuter selon un Programme fixe modifiable ou adaptable.
- ✓ Le robot est un système automatique dont la partie opérative est une structure mécanique articulée.



**Figure I.2 Parties commande- contrôle et opérative d'un robot**

Pour « mériter » le nom de robot, un système doit posséder une certaine flexibilité Caractérisée par les propriétés suivantes :

- 
- 
- La versatilité : Un robot doit avoir la capacité de pouvoir exécuter une variété de Tâches, ou la même tâche de différentes manières ;
  - L'auto-adaptabilité : Un robot doit pouvoir s'adapter à un environnement Changeant au cours de l'exécution de ses tâches.
  - 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 (i.e., usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. [2]

#### **I.4. Les Systèmes Mécaniques Robotisé :**

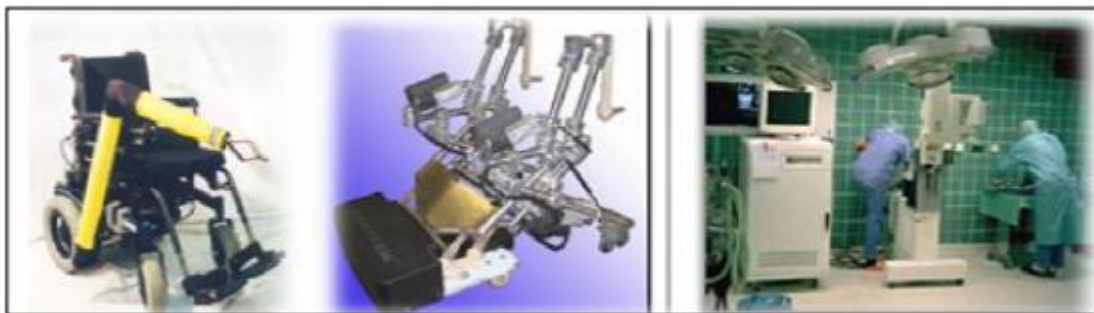
Les systèmes robotiques intéressent de très nombreux domaines civils et militaires. Les Grands champs d'application de la robotique sont :

1. La production manufacturière (usinage, assemblage, soudure, polissage, formage, etc.)
2. Les interventions en milieux hostiles (sous-marin, nucléaire, exploration, planétaire, etc.)
3. Les systèmes de transport des biens et des personnes (véhicules intelligents, robots mobiles, etc.) [3]
4. L'aide et l'assistance aux personnes (robots personnels, aides techniques, etc.)
5. Les nombreux domaines de la santé (chirurgie, rééducation, etc.).
6. Le ludique (robots jouets)

Ils prennent des formes très diverses du point de vue de leur structure mécanique et de leur Commande. Plusieurs types de robots 'génériques' sont illustrés sur les figures qui suivent.



**Figure I.3 Robot humanoïde - Robot série de type scara - Robot série anthropomorphe.**

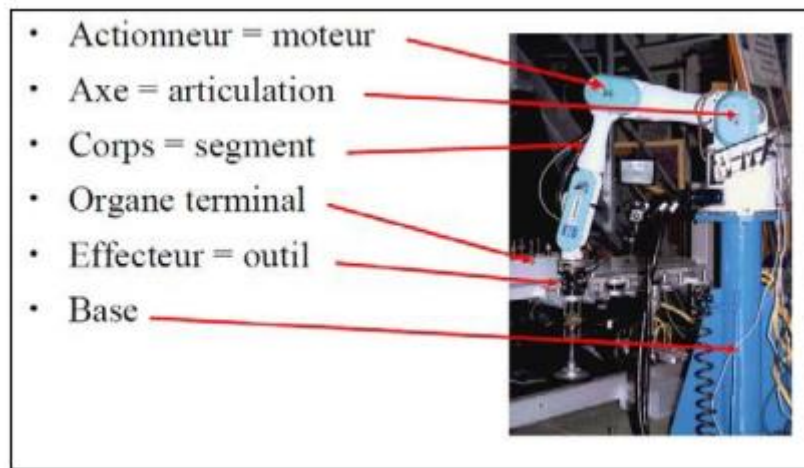


**Figure I.4 Fauteuil équipé d'un bras- Robot chirurgical déambulateur//verticaliste.**



**Figure I.5 Main articulée-Robot chien-Robot hexapode.**

## **I.5. Constituants d'un robot :**



**Figure I.6 Nomenclature de robot**

On distingue classiquement 4 parties principales dans un robot manipulateur :

- **Organe terminal** : l'organe terminal est un dispositif fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique (bras). Il est destiné à manipuler des objets (dispositif de serrage, dispositifs magnétiques, ...), ou à les transformer (outil, touche de soudage, pistolet de peinture etc.).
- Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.
- Le système mécanique articulé (S.M.A) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action (le terme « manipulateur » exclut implicitement les robots mobiles autonomes). 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 (ou supposés comme tels), 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. [4]

- 
- Les actionneurs : le S.M.A. comporte des moteurs le plus souvent avec des transmissions, l'ensemble constitue les actionneurs. Les actionneurs utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit.
  - Les capteurs : les organes de perception permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les capteurs dits proprioceptifs lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesse des articulations) et extéroceptifs lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement.
  - La partie commande : synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur. S'ajoutent à cela l'interface homme machine à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter. [4]

## I.6. Différentes catégories de robots :

### 1.6.1 Robot mobile

Un robot mobile est un système mécanique, électrique et informatique agissant physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné. Cette machine est polyvalente et capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement. Elle est dotée de fonction de perception, de décision et d'actions.



**Figure I.7 Robots mobiles**

### 1.6.2. Robot sous- marins

---

Un robot sous – marins autonome est un robot qui se déplace dans l’eau de manière autonome contrairement auROV. ROV : Un rov (qu’on pourrait traduire par « véhicule sous-marins téléguidées ». :[5]



**Figure I.8 Robot sous- marin**

### **1.6.3. Robots volants**

Un drone désigne un aéronef sans pilote à bord, il peut avoir un usage civil ou militaire. Les drones sont utilisés au profit des forces armées ou de sécurité. :[5]



**Figure I.9 Robot volant**

### **1.6.4. La robotique industrielle**

---

La robotique industrielle est officiellement définie par l'ISO, comme un contrôle automatique, reprogrammable dans trois ou plusieurs axes. Les applications typiques incluent des robots de soudage de peinture et d'assemblage. Les robots industriels sont très utilisés en automobiles.



**Figure I.10 Robots industriels**

### **1.6.5. La robotique domestique**

Un robot domestique est un robot de service personnel utilisé pour des tâches ménagères. Jusqu'à présent, il n'y a que des rares modèles. Les robots domestiques sont utilisés par exemple en vaisselle, en nettoyage et en cuisine. :[5]



**Figure I.11 Robot domestique**

### **1.6.6. Le robot médical**

---

Un robot médical est un système robotique utilisé dans le cadre d'une application thérapeutique, par exemple lors d'une chirurgie ou au cours d'un programme de réhabilitation neuromatrice. Du fait des contraintes importantes en matière de sécurité, ce type de robot est en général doté d'un faible niveau d'autonomie.



**Figure I.12 Le robot médical**

### **1.6.7. La robotique militaire**

Les robots sont beaucoup utilisés par l'armée pour simplifier la vie des soldats et limiter les pertes humaines, en voici quelques catégories :

- Les robots démineurs.
- Les drones.
- Les robots de combat.

Le premier robot militaire étant le 'Goliath' utilisé par l'armée allemande durant la 2ème guerre mondiale. :[5]



Figure I.13 La robotique militaire

## I.7. Classification géométrique :

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

### I.7.1. Structure cartésienne (PPP) :

A trois liaisons prismatiques, est la plus ancienne historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil à trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure est relativement peu utilisée, sauf dans quelques applications particulières : robots pratiques, robots de magasinage, par exemple [6].



Figure I.14. Structure d'un Robot cartésien. [7]

### I.7.2. Structure cylindrique (RPP) ou (PRP) :

Associe une rotation et deux translations. Elle présente l'inconvénient d'offrir un volume de travail faible devant un encombrement total important. Elle n'est pratiquement plus utilisée [8].

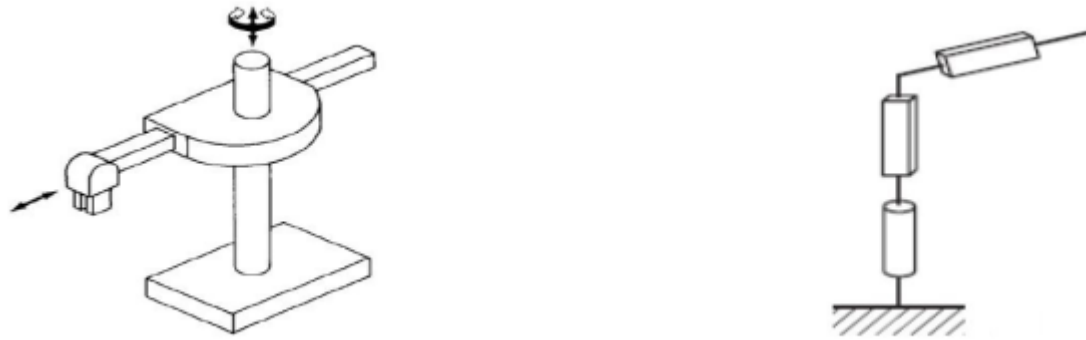


Figure I.15. Structure d'un robot cylindrique. [7]

### I.7.3. Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale :

Est une structure quasiment abandonnée pour des raisons similaires à l'abandon de la structure cylindrique [6].



Figure I.16. Structure d'un robot sphérique. [7]

### I.7.4. Structure dite SCARA :

A axes de rotation parallèles est l'une des plus utilisées, en particulier pour des tâches de manutention ou d'assemblages très fréquents dans l'industrie. Ce succès commercial est lié au fait que le ratio entre le volume de travail et l'encombrement est très favorable et aussi que la structure SCARA est très adaptée à ce type de tâches [6]

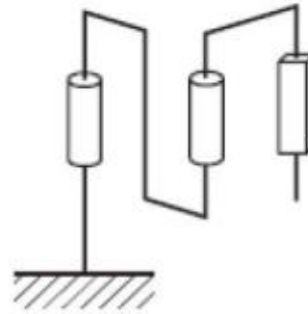


Figure I.17. Structure d'un robot SCARA. [7]

### I.7.5. Structure 3R (anthropomorphe) :

Permet d'amener un solide en un point de l'espace par trois rotations, généralement une à axe vertical et deux à axes horizontaux et parallèles c'est le porteur généraliste par excellence, pouvant se programmer facilement pour différents types de tâches et disposant d'un volume de travail conséquent [6].

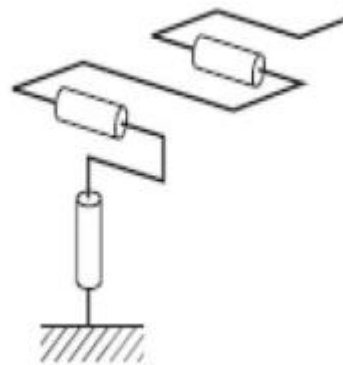
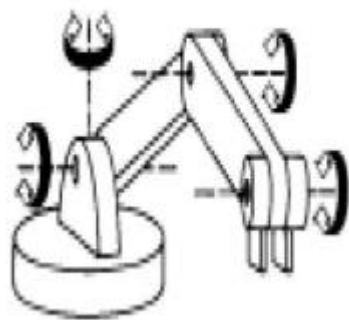


Figure I.18. Structure d'un robot 3R. [7]

### I.8. Caractéristiques d'un robot :

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

- Charge utile transportable par le robot.
- Espace de travail : c'est l'ensemble des situations de l'espace que l'organe terminal du robot peut atteindre.

- 
- 
- Vitesses et les accélérations maximales, qui conditionnent le temps du cycle.
  - Performances (l'écart entre une situation commandée et la moyenne des situations atteintes) [9].

## **I.9. Domaines d'application :**

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

### **I.9.1. Tâches simples :**

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

- Tâche est assez simple pour être robotisée.
- Critères de qualité sur la tâche sont importants.
- Pénibilités de la tâche (peinture, charge lourde, environnement hostile, ...). Exemples de robots utilisés pour des tâches simples : robots soudeurs par points et robots soudeurs à l'arc.

### **I.9.2. Tâches complexes :**

Robotique de service :

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

## **I.10 Les bras manipulateurs**

### **I.10.1 Définition**

Un bras manipulateur est un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Les liens de ce manipulateur sont reliés par des axes permettant, soit du mouvement de rotation (comme dans un robot articulé) ou de translation (linéaire) de déplacement. Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut effectuer une variété de tâches avec une grande précision. Les bras manipulateurs peuvent être fixes ou mobiles (avec ou sans roues) et peuvent être conçus pour des applications industrielles.



**Figure I.19 un bras manipulateur industriel**

Les positions sont définies par des longueurs et des angles qui correspondent à des paramètres de constructions des bras. Ce sont donc des grandeurs constantes pour un bras donné, qui caractérisent sa géométrie. Le manipulateur mécanisme généralement composé d'éléments en série articulaires ou coulissants l'un par rapport à l'autre, dont le but est la saisie et déplacement d'objets suivant plusieurs degrés de liberté. Il est multifonctionnel et peut- être commandé directement par un opérateur humain ou par tout système logique (système à cames, logique pneumatique, logique électrique câblée ou programmée), et le robot industriel « Manipulateur automatique, asservi en position, reprogrammable, polyvalent, capable de positionner et d'orienter des matériaux ou pièces, outils ou dispositif spécialisés au cours de mouvement variables et programmés pour l'exécution de tâches variées, il se présente souvent sous la forme d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception de l'environnement. 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.

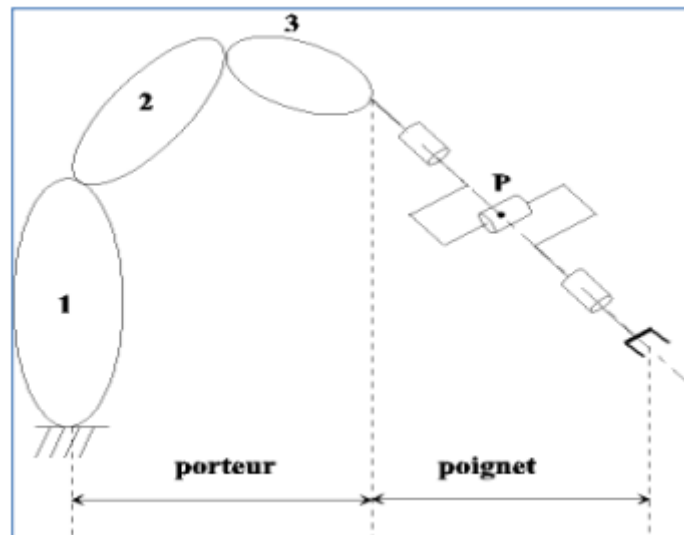
### **I.10.2 Structure mécanique des bras manipulateurs**

Le bras manipulateur est constitué de deux parties principales :

✓ Organe terminal : 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. Les tâches qui sont dévolues aux bras sont très variées. Pour chaque opération ou travail spécifique, l'organe terminal prend un aspect particulier.

✓ Élément porteur : il est composé d'un ensemble de corps souples ou rigides liés par des articulations, servant à déplacer l'organe terminal d'une configuration à une autre. Le porteur a pour rôle de fixer la position du point d'intersection, noté P, des axes des 3 dernières articulations (centre du poignet) ; cette position (P) ne dépend que de la Configuration des solides (corps) 1,2 et 3 (i.e., du porteur),

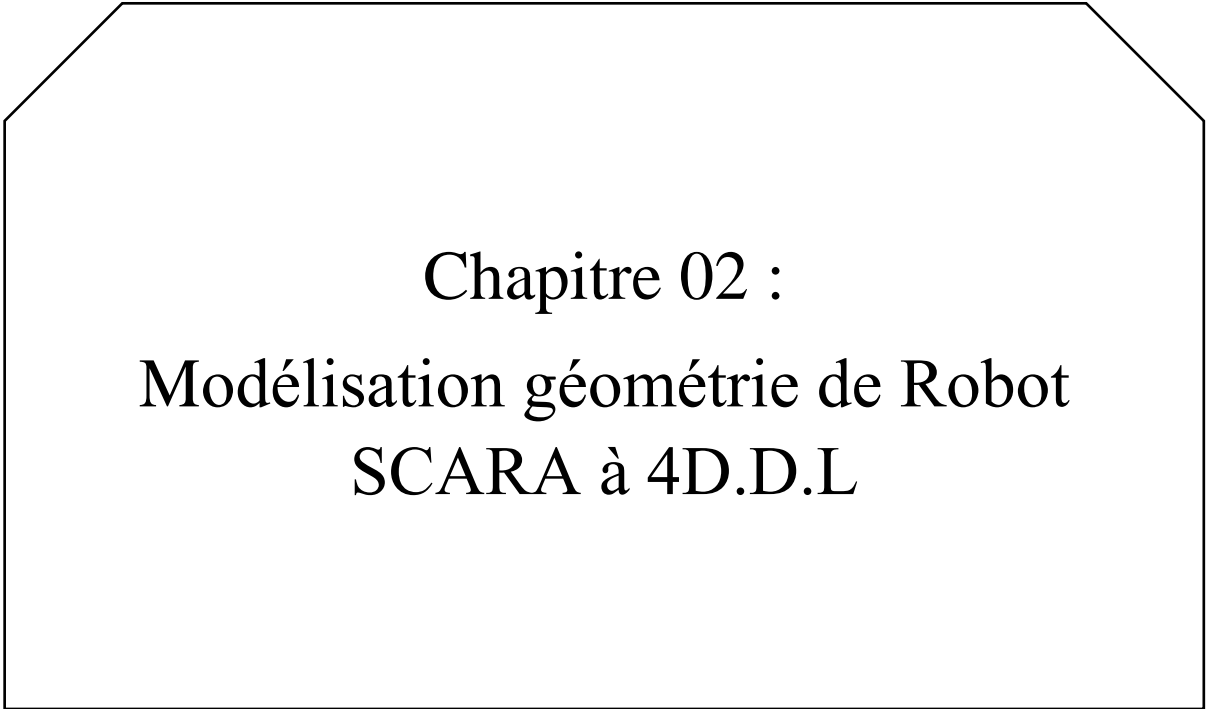
- le poignet est destiné à l'orientation de l'organe terminal (pince, outil).



**Figure I.20 Structure de bars manipulateurs**

### **I.11. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la robotique : l'historique des robots, leurs structures, leurs utilisations, leurs différents types, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'application ce qui va nous servir pour la construction de notre bras.



Chapitre 02 :  
Modélisation géométrie de Robot  
SCARA à 4D.D.L

---

---

## II.1 Introduction

Pour concevoir ou commander un robot, il est nécessaire, entre autres, de disposer de modèles du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles. Ils dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée : il en découle des modèles géométriques, cinématiques et dynamiques à partir desquels peuvent être engendrés les mouvements du robot, ou bien des modèles statiques qui décrivent les interactions du mécanisme avec son environnement. L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée, la difficulté variant selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Entrent en ligne de compte le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée.

La modélisation du robot de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées, la plus répandue est celle de Denavit-Hartenberg.

Dans ce chapitre, nous allons donner La modélisation de notre bras manipulateur type SCARA à 4 articulations sera, également, présentée. Cette modélisation consiste à trouver le modèle géométrique direct et inverse qui exprime la situation de l'organe terminal en fonction des articulaires du mécanisme et inversement, le modèle cinématique direct et inverse qui exprime la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires du mécanisme et inversement, et le modèle dynamique qui donne les équations du mouvement d'un robot manipulateur

## II.2 Modélisation géométrique :

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

les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot).

On distingue :

- les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement .

On présente dans ce chapitre quelques méthodes permettant d'établir ces modèles. On se limitera au cas des robots à structure ouverte simple.

### II.2.1 Description géométrique :

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 [17], [18], [19], [20], [21], [22]. La plus répandue est celle de Denavit-Hartenberg [17]. 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. C'est pourquoi nous précisons la notation de Khalil et Kleininger qui permet la description homogène et avec un nombre minimum de paramètres des architectures ouvertes simples et complexes de systèmes mécaniques articulés [23].

Une structure ouverte simple est composée de  $n+1$  corps notés  $C_0, \dots, C_n$  et de  $n$  articulations. Le corps  $C_0$  désigne la base du robot et le corps  $C_n$  le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation  $j$  connecte le corps  $C_j$  au corps  $C_{j-1}$  (figure 1). La méthode de description est fondée sur les règles et conventions suivantes:

Les corps sont supposés parfaitement rigides, ils sont connectés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité), soit rotoïdes, soit prismatiques.

le repère  $R_j$  est lié au corps  $C_j$ .

l'axe  $z_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $j$ .

l'axe  $x_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $z_j$  et  $z_{j+1}$ . Si les axes  $z_j$  et  $z_{j+1}$  sont parallèles ou colinéaires, le choix de  $x_j$  n'est pas unique : des considérations de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.

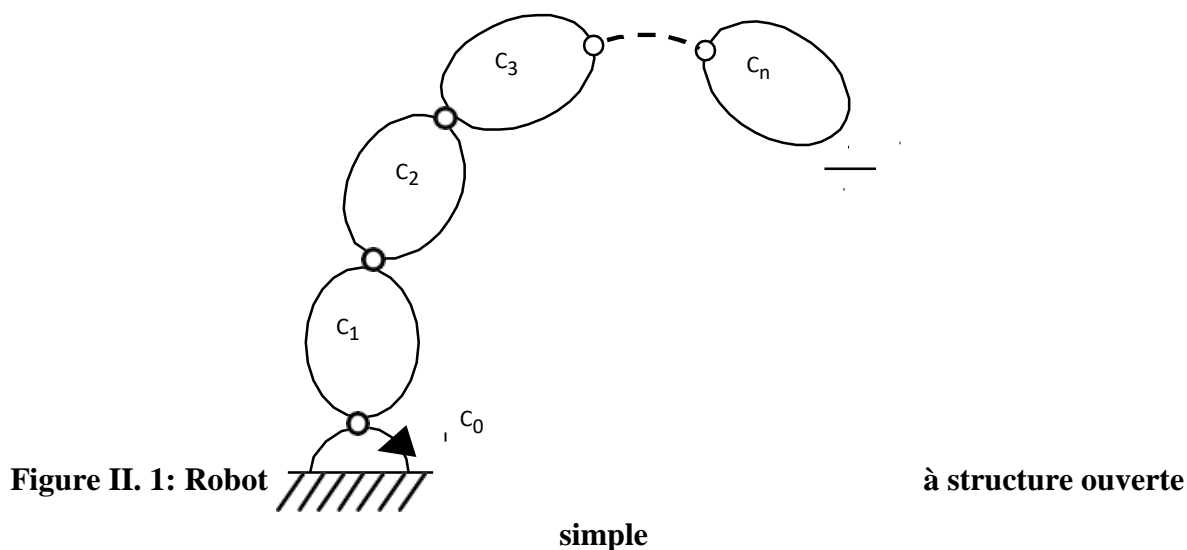
Le passage du repère  $R_{j+1}$  au repère  $R_j$  s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants (figure II. 1) :

$\alpha_j$  : angle entre les axes  $z_{j-1}$  et  $z_j$  correspondant à une rotation autour de  $x_{j-1}$ .

$d_j$  : distance entre  $z_{j-1}$  et  $z_j$  le long de  $x_{j-1}$ .

$\theta_j$  : angle entre les axes  $x_{j-1}$  et  $x_j$  correspondant à une rotation autour de  $z_j$ .

$r_j$  : distance entre  $x_{j-1}$  et  $x_j$  le long de  $z_j$ .



## II.2 Paramétrage de Denavit-Hartenberg :

Denavit et Hartenberg [24] proposent en 1955 une méthode systématique d'attribution de référentiels aux membres d'une chaîne cinématique, permettant d'établir les transformations de passage entre articulations adjacentes. Cette méthode, communément appelée convention de Denavit et Hartenberg ou convention DH, concerne essentiellement les chaînes cinématiques ouvertes, dont chaque articulation possède un degré de liberté en rotation ou en translation.

La méthode de denavit-hartenberg est bien adaptée pour les mécanismes à structures de chaînes simples. Elle n'utilise que quatre paramètres pour définir la position et l'orientation d'un corps par rapport à un corps voisin de la chaîne.

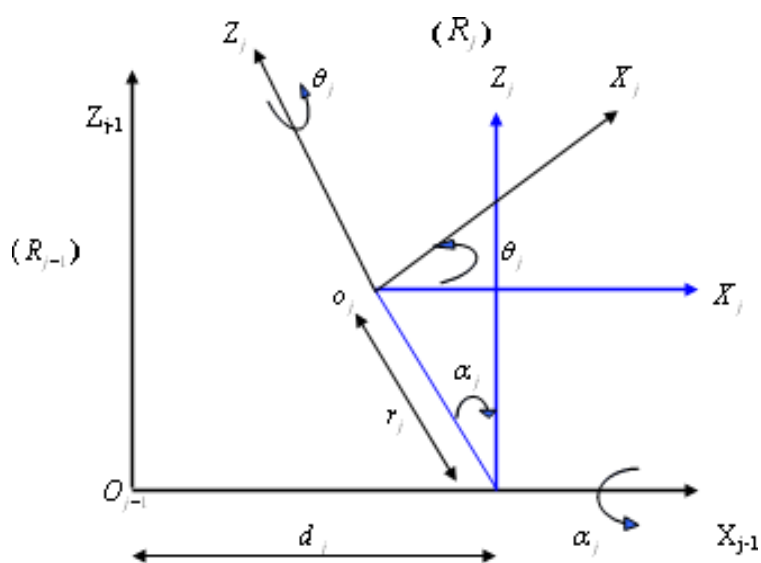
Dans ce qui suit on va présenter la méthode et les paramètres de Denavit-Hartenberg.

Pour le calcul des matrices de passage (matrice de transformation homogène) successives  $T_i^{i-1}$ , on recherche un paramétrage des liaisons telles que les matrices de passages aient toutes la même forme littérale, ce qui facilitera grandement les calculs.

Denavit-Hartenberg [24] a établi une convention pour définir un repère  $R_j$  par rapport à un autre repère  $R_{j-1}$  (Figure 3.3). Le repère  $R_j$  fixé au corps  $C_j$ , est défini de sorte que :

- l'axe  $Z_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $j$ .
- l'axe  $X_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $Z_j$  et  $Z_{j+1}$ .

Si les axes  $Z_j$  et  $Z_{j+1}$  sont parallèles ou colinéaires, le choix de  $X_j$  n'est pas unique : des considérations de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.



**Figure II. 2 :** Paramétrage de Denavit Hartenberg.

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

- $\alpha_j$  : Angle de rotation autour de  $X_{j-1}$  entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$
- $d_j$  : distance entre  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  le long de  $X_{j-1}$
- $\theta_j$  : Angle de rotation autour de  $Z_j$  entre les axes  $X_{j-1}$  et  $X_j$
- $r_j$  : distance entre  $X_{j-1}$  et  $X_j$  le long de  $Z_j$

La variable articulaire  $q_j$  associée à la  $j^{\text{ème}}$  articulation est soit  $\theta_j$  soit  $r_j$ , selon que cette articulation est de type rotoïde ou prismatique, ce qui se traduit par la relation:

$$q_j = \bar{\sigma}_j \theta_j + \sigma_j r_j \quad (\text{II.1})$$

avec :

$\sigma_j = 0$  si l'articulation  $j$  est rotoïde.

$\sigma_j = 1$  si l'articulation  $j$  est prismatique.

$$\text{Donc : } \bar{\sigma}_j = 1 - \sigma_j$$

La matrice de transformation définissant le repère  $R_j$  dans le repère  $R_{j-1}$  est donnée par

$$\text{(figure II. 2): } T_j^{j-1} = \mathbf{Rot}(x, \alpha, j) \mathbf{Trans}(x, d_j) \mathbf{Rot}(z, \theta_j) \mathbf{Trans}(z, r_j) \quad (\text{II. 2})$$

$$A_j^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 \\ \cos \alpha_j \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\sin \alpha_j \\ \sin \alpha_j \sin \theta_j & \sin \alpha_j \cos \theta_j & \cos \alpha_j \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

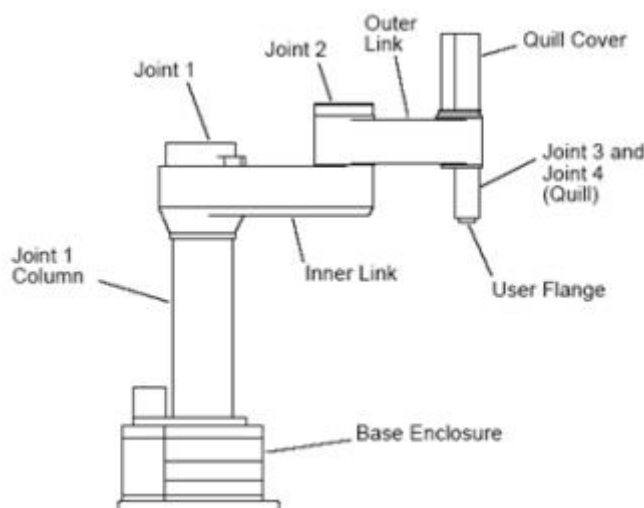
$$P_j^i = \begin{bmatrix} d_j \\ -r_j \sin \alpha_j \\ r_j \cos \alpha_j \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La transformation inverse  ${}^jT_i$  s'écrit:

$$T_i^j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & d_j \\ \cos \alpha_j \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\sin \alpha_j & -r_j \sin \alpha_j \\ \sin \alpha_j \sin \theta_j & \sin \alpha_j \cos \theta_j & \cos \alpha_j & r_j \cos \alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

où  $\mathbf{Rot}(u, \alpha)$  et  $\mathbf{Trans}(u, d)$  sont des matrices de transformation homogène (4x4) représentant respectivement une rotation  $\alpha$  autour de l'axe  $\mathbf{u}$  et une translation  $d$  le long de  $\mathbf{u}$ .

Notre Robot de type RRPR (Figure II.3) est un bras à 4 articulations : 3 rotoïde et une articulation prismatique lui conférant quatre degrés de liberté caractérisées par des mouvements de rotation : les 2 articulations de ce manipulateur caractérisent pour la première une rotation autour d'un axe vertical, les mouvements sont identifiés par les variables  $\theta_1, \theta_2$ , et déplacement par une articulation prismatique et une rotation  $\theta_4$ .



Structure de Robot SCARA

L'utilisation du paramétrisation de Denavit-Hartenberg (DH) facilite la description géométrique du manipulateur. La position initiale et la disposition des repères des liaisons telle indiquée aussi les paramètres du bras de Robot suivant la convention de Denavit-Hartenberg sont donnés au (tableau II.1).

J	$\sigma_j$	$\alpha_j$	$d_j$	$\theta_j$	$R_j$
1	0	0	0	$\theta_1$	<b>R1</b>
2	0	180	0	$\theta_2$	<b>R2</b>
3	1	0	D3	0	0
4	0	0	D4	$\theta_4$	0

Tableau II 1: Paramètres géométriques d'un Robot (RRPR).

## II.3 Modèle géométrique

### II.3.1 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. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de transformation  $T_n^0$  :

$$T_n^0 = T_1^0(q_1)T_2^1(q_2) \dots \dots T_n^{n-1}(q_n) \quad (\text{II.6})$$

Le modèle géométrique direct du robot peut aussi être représenté par la relation :

$$\mathbf{X} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (\text{II.7})$$

$\mathbf{q}$  étant le vecteur des variables articulaires tel que :

$$\mathbf{q} = [q_1 q_2 \dots \dots q_n]^T \quad (\text{II.8})$$

Les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$\mathbf{X} = [X_1 X_2 \dots \dots X_n]^T \quad (\text{II.9})$$

Plusieurs possibilités existent pour la définition du vecteur  $\mathbf{X}$ . Par exemple, avec les éléments de la matrice  $T_n^0$  :

$$\mathbf{X} = [P_x P_y P_z \quad s_x s_y s_z \quad n_x n_y n_z \quad a_x a_y a_z]^T \quad (\text{II.10})$$

ou bien, sachant que  $\mathbf{s} = \mathbf{n}\mathbf{x}\mathbf{a}$  :

$$\mathbf{X} = [P_x P_y P_z \quad n_x n_y n_z \quad a_x a_y a_z]^T \quad (\text{II.11})$$

Pour les rotations, d'autres représentations sont couramment utilisées comme les angles d'Euler, les angles de Roulis-Tangage-Lacet (RTL) ou les paramètres d'Euler (quaternions). On peut facilement passer des cosinus directeurs  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{a}$  à l'une quelconque de ces représentations et inversement [25].

✚ Modèle géométrique direct du robot RRPR (figure II.3). A partir du tableau (II.1), la relation (II.4) permet d'écrire les matrices de transformation élémentaires  $T_j^{j-1}$ .

- Les matrices de passage intermédiaires:

T(1),T(2),T(3), T(4),

$$T(1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -R_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(4) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & D_4 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Matrices de passage globales:

Le produit  $T_4^0$  de ces matrices a pour composantes : (II.15)

$$u(1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) + \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * D_3 + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * D_3 \\ -\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) + \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) * D_3 - \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * D_3 \\ 0 & 0 & -1 & -R_2 + R_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc les coordonnées opérationnelles du point final sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_x = \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * D_3 + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * D_3 \\ P_y = \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) * D_3 - \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * D_3 \\ P_z = -R_2 + R_1 \end{cases}$$

### II.3.2 Modèle géométrique inverse :

On a vu que le modèle géométrique direct d'un robot permettait de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires. Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'elle existe, la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles (il y a rarement unicité de solution) constitue ce que l'on appelle le modèle géométrique inverse (MGI). On peut distinguer trois méthodes de calcul du MGI :

- 
- la méthode de Paul [26] qui traite séparément chaque cas particulier et convient pour la plupart des robots industriels ;
  - la méthode de Pieper [27] qui permet de résoudre le problème pour les robots à trois degrés de liberté possédant trois articulations rotoïdes d'axes concourants ou trois articulations prismatiques ;
  - la méthode générale de Raghavan et Roth [28], donnant la solution générale des robots à six articulations à partir d'un polynôme de degré au plus égal à 16.

Lorsqu'il n'est pas possible de trouver une forme explicite du modèle géométrique inverse, on peut calculer une solution particulière par des procédures numériques [27], [29], [30], [31], [32], [33], [34]. On ne présente dans ce paragraphe que la méthode de Paul, celles de Pieper et de Raghavan et Roth étant détaillées dans [25].

### II.3.3 Position du problème :

Soit  ${}^fT_E^d$  la matrice de transformation homogène représentant la situation désirée du repère outil RE par rapport au repère atelier Rf. Dans le cas général, on peut exprimer  ${}^fT_E^d$  sous la forme :

$${}^fT_E^d = ZT_{n(q)}^0 E \quad (\text{II.17})$$

expression dans laquelle (figure II.4) :

- $Z$  est la matrice de transformation définissant la situation du robot (repère  $R_0$ ) dans le repère atelier ;
- $T_n^0$  est la matrice de transformation du repère terminal  $R_n$  dans le repère  $R_0$  fonction du vecteur des variables articulaires  $q$  ;
- $E$  est la matrice de transformation définissant le repère outil  $R_E$  dans le repère terminal  $R_n$ .

Lorsque  $n \geq 3$ , on peut écrire la relation suivante en regroupant dans le membre de droite tous les termes connus :

$$T_{n(q)}^0 = Z^{-1} T_E^d E^{-1} \quad (\text{II.18})$$

Lorsque  $n < 3$ , l'espace opérationnel du robot est de dimension inférieure à trois. Il n'est pas possible de faire coïncider le repère outil  $R_E$  avec un repère  $R_E^d$  décrivant la tâche sauf lorsque les repères  $R_E$  et  $R_E^d$  sont conditionnés de façon bien particulière pour s'adapter au nombre insuffisant de degrés de liberté. Pratiquement, au lieu d'amener le repère  $R_E$  sur le repère  $R_E^d$ , on cherchera à faire coïncider entre eux des éléments géométriques liés à ces repères (points, droites).

Dans le calcul du MGI, trois cas se présentent :

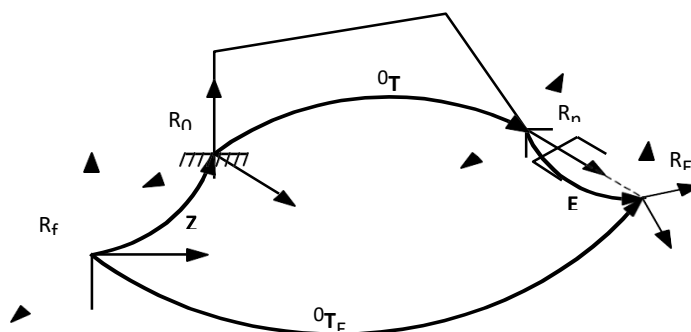
– a) absence de solution lorsque la situation désirée est en dehors de la zone accessible du robot. Celle-ci est limitée par le nombre de degrés de liberté, les débattements articulaires et la dimension des segments :

– b) infinité de solutions lorsque :

- le robot est redondant vis-à-vis de la tâche .

- le robot se trouve dans certaines configurations singulières .

– c) solutions en nombre fini, exprimées par un ensemble de vecteurs  $\{q^1 \dots q^T\}$ . On dit qu'un robot manipulateur est résoluble [27], [35] lorsqu'il est possible de calculer toutes les configurations permettant d'atteindre une situation donnée. Aujourd'hui, tous les manipulateurs série ayant jusqu'à six degrés de liberté et qui ne sont pas redondants peuvent être considérés comme résolubles [36], [28]. Le nombre de solutions dépend de l'architecture du robot manipulateur



**Figure II. 5:** Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier

### II.3.4 Principe de la méthode de Paul :

Considérons un robot manipulateur dont la matrice de transformation homogène a pour expression :

$${}^{n-1}T_n(q_n) \mathbf{T}_1^0 = \mathbf{T}_1^0(q_1) \mathbf{T}_2^1(q_2) \dots \mathbf{T}_{n(qn)}^{n-1} \quad (\text{II.19})$$

Soit  $U_0$  la situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = \mathbf{T}_1^0(q_1) \mathbf{T}_2^1(q_2) \dots \mathbf{T}_{n(qn)}^{n-1} \quad (\text{II.21})$$

Pour trouver les solutions de l'équation (II.21) Paul [26] a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation (II.21) par les matrices  $\mathbf{T}_{j-1}^j$  pour  $j$  variant de 1 à  $n-1$ , opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une

après l'autre les variables articulaires que l'on recherche. Pour un robot à six degrés de liberté par exemple, on procède comme suit :

– multiplication à gauche de l'expression (II.21) par  $\mathbf{T}_0^1$  :

$$\mathbf{T}_0^1 U_0 = \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \quad (\text{II.22})$$

Le terme de droite est fonction des variables  $q_2, \dots, q_3$ . Le terme de gauche n'est fonction que des éléments de  $U_0$  et de la variable  $q_1$  .

– identification terme à terme des deux membres de l'équation (II.22) .

On se ramène à un système d'une ou de deux équations fonction de  $q_1$  uniquement, dont la structure appartient à un type particulier parmi une dizaine de types possibles ;

– multiplication à gauche de l'expression (II.22) par  $\mathbf{T}_1^2$  et calcul de  $q_2$ .

La succession des équations permettant le calcul de tous les  $q_j$  est la suivante :

$$U_0 = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2$$

$$\mathbf{T}_0^1 \mathbf{U}_0 = \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \quad (\text{II.23})$$

$$\mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_0^1 \mathbf{U}_0 = \mathbf{T}_3^2$$

$$\mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{U}_0 = \mathbf{T}_4^3$$

$$T(1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -R2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(4) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & D4 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

les éléments des deuxièmes membres ayant déjà été calculés lors du calcul du MGD :

$$\mathbf{U}_j = \mathbf{T}_3^j = \mathbf{T}_{j-1}^j \mathbf{U}_{j-1} \quad (\text{II.24})$$

L'utilisation de la méthode sur un grand nombre de robots industriels a permis de constater que les types d'équations rencontrés sont peu nombreux et que leur résolution même si elle nécessite parfois quelques développements reste cependant relativement simple [25].

Les matrices de rotations de A(1) à A(4) :

$$A(1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A(2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$A(3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A(4) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## II.4 Modélisation cinématique

Dans le modèle géométrique on prend en considération seulement la position et l'orientation des corps et de l'organe terminal, dans le modèle cinématique, Il y a apparition des vitesses de l'organe terminal et les vitesses articulaires.

### II.4.1. Modèle cinématique direct (MCD)

Le MCD est donné comme suite :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial f}{\partial q} \cdot \frac{dq}{dt}$$

### II.4.2. Modèle cinématique inverse(MCI)

Le modèle cinématique inverse nous permet l'obtention des vitesses qu'il faut appliquer aux actionneurs en fonction des vitesses désirées pour l'organe terminal dans l'espace de la tâche, il est donné sous la forme suivante :

$$Q = j^{-1}(q)\dot{x}$$

**Matrice Jacobienne :**

$$j_{0,1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 - \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 \\ \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$j_{0,2} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 + \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 \\ -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 - \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

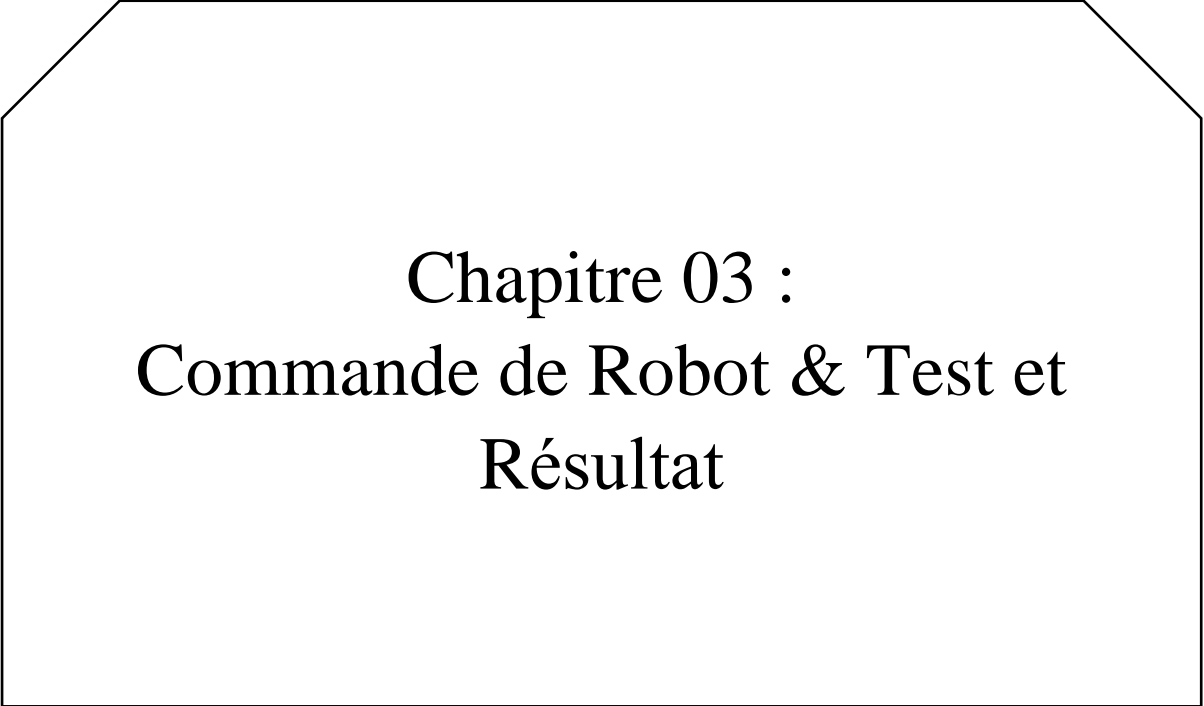
$$j_{0,3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$j_{0,4} = \left[ \left[ -U(5)_{2,4} \cos(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) + \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) + \sin(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) \right] + \left[ U(5)_{1,4} \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) \right], \left[ \left[ -U(5)_{2,4} \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) \right] + U(5)_{1,4} (-\sin(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) + \sin(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2)) \right], [0], [0], [0], [-1] \right]$$

$$j_{0,4} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 - \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 & -\cos(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 + \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 & 0 \\ \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 & -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) D3 - \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) D3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

## II.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre nous avons donné, également, les outils mathématiques utilisés dans la robotique pour trouver le modèle géométrique, le modèle cinématique et dynamique des robots manipulateurs. Nous nous sommes focalisés particulièrement sur la modélisation dynamique d'un robot manipulateur de type SCARA à quatre degrés de liberté (4ddl) pour une utilisation ultérieure.



**Chapitre 03 :**  
**Commande de Robot & Test et**  
**Résultat**



## III.1. Introduction

La conception est une étape très importante qui précède l'implémentation de tout le système. Dans ce chapitre, nous allons réaliser robot Scara a 4 d.l.1 premièrement à partir la simulation sur le logiciel Proteus après on va miser en réelle ce système. On va citer les différent composant qui nous avons utilisé et le code qui nous avons créé sur arduino ide.

## III.2 Partie simulation

### III.2.1 Présentation du Proteus

Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connue pour éditer des schémas électriques. De plus, nous pouvons également simuler ces schémas et ainsi permettre la détection de certaines erreurs de conception.

### III.2.2 Présentation des outils de la simulation

Avant de passé à la réalisation, nous avons simulé Proteus pour la simulation de circuits et Arduino IDE pour la programmation de circuits.

### III.2.3 Création d'un projet

Le processus de création d'un nouveau projet est vraiment très simple. Sélectionnez new Project (nouveau projet) de puis le menu Project (projet), comme indiqué sur figure III.1.

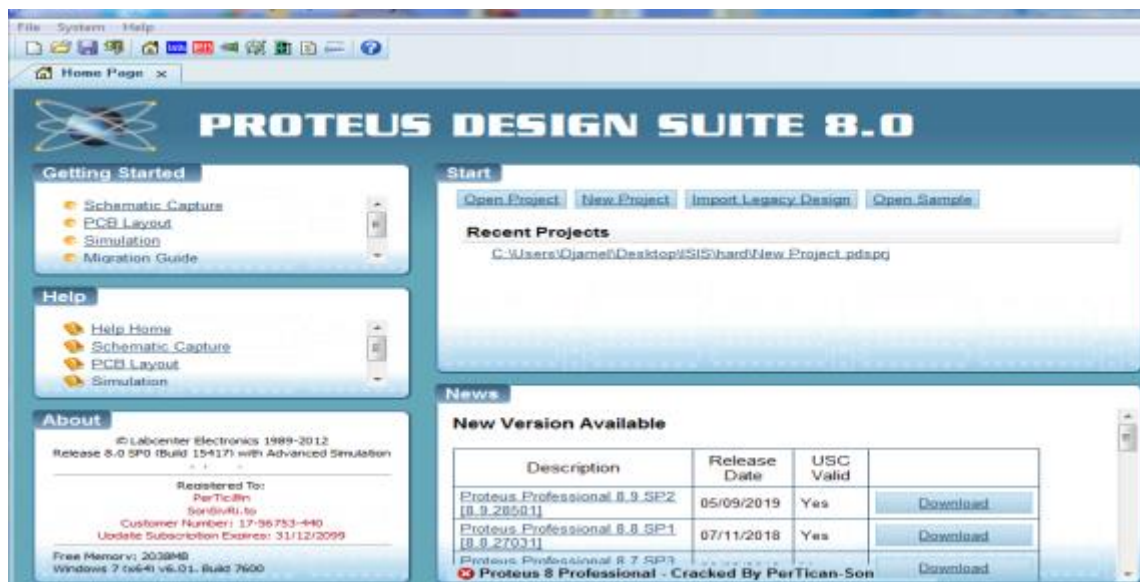


Figure III.1 Création d'un projet

Une nouvelle fenêtre apparaîtra comme indiqué sur figure III.2. Sélectionnez le nom et l'emplacement du projet, puis cliquez sur next pour ouvrir une nouvelle fenêtre vide pour écrire notre circuit.

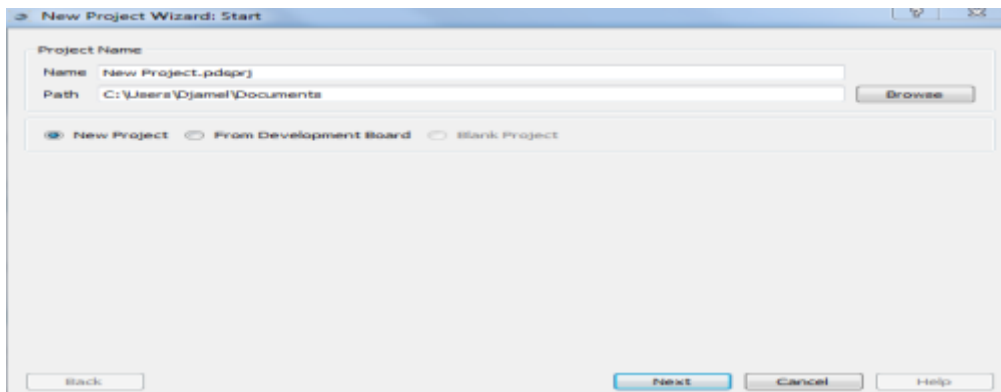


Figure III.2 Configurations de projet

### III.2.5 Circuit de projet sur Proteus

D'après la bibliothèque de ce programme on va ajouter 3 potentiomètres avec un carte Arduino uno et deux boutons poussoir qui Controller a 5 servos moteur

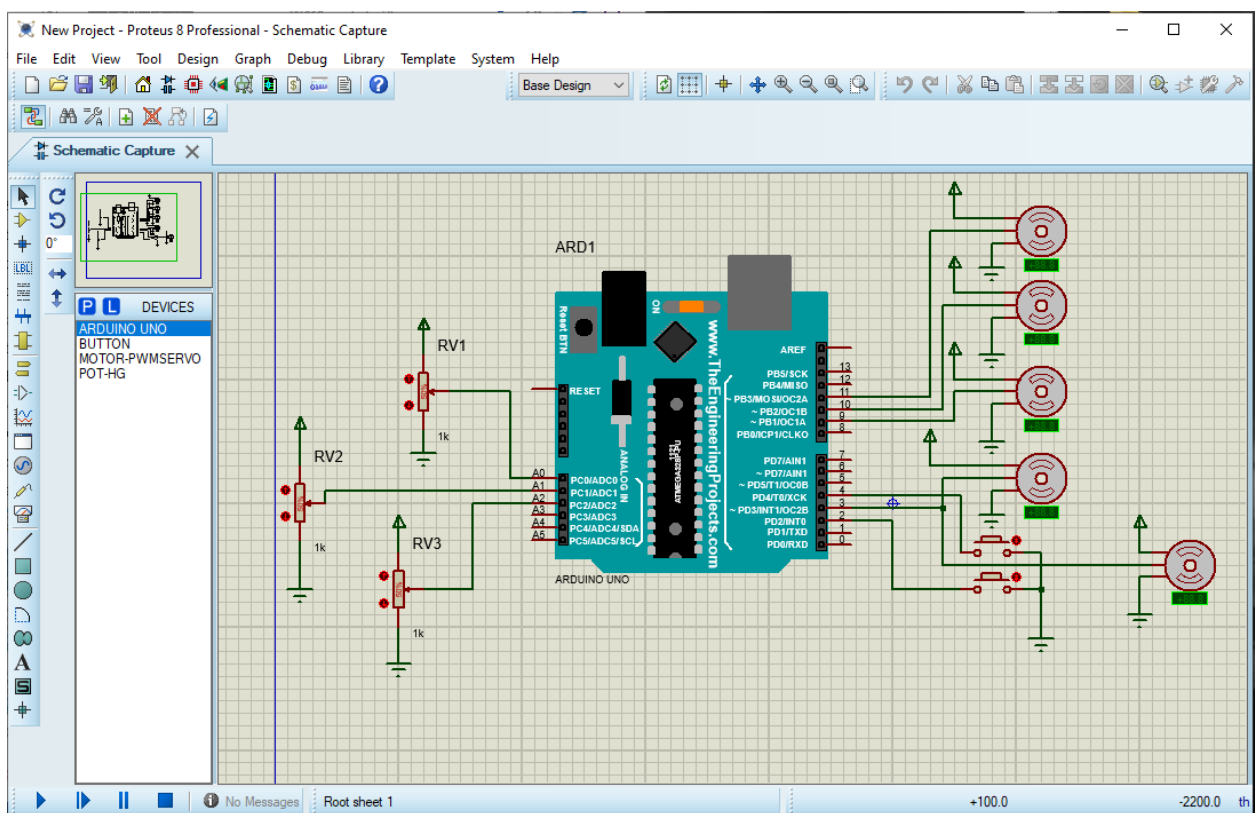


Figure III.3 Circuit de projet sur Proteus

### III.2.6 Etapes de création des schémas électriques :

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

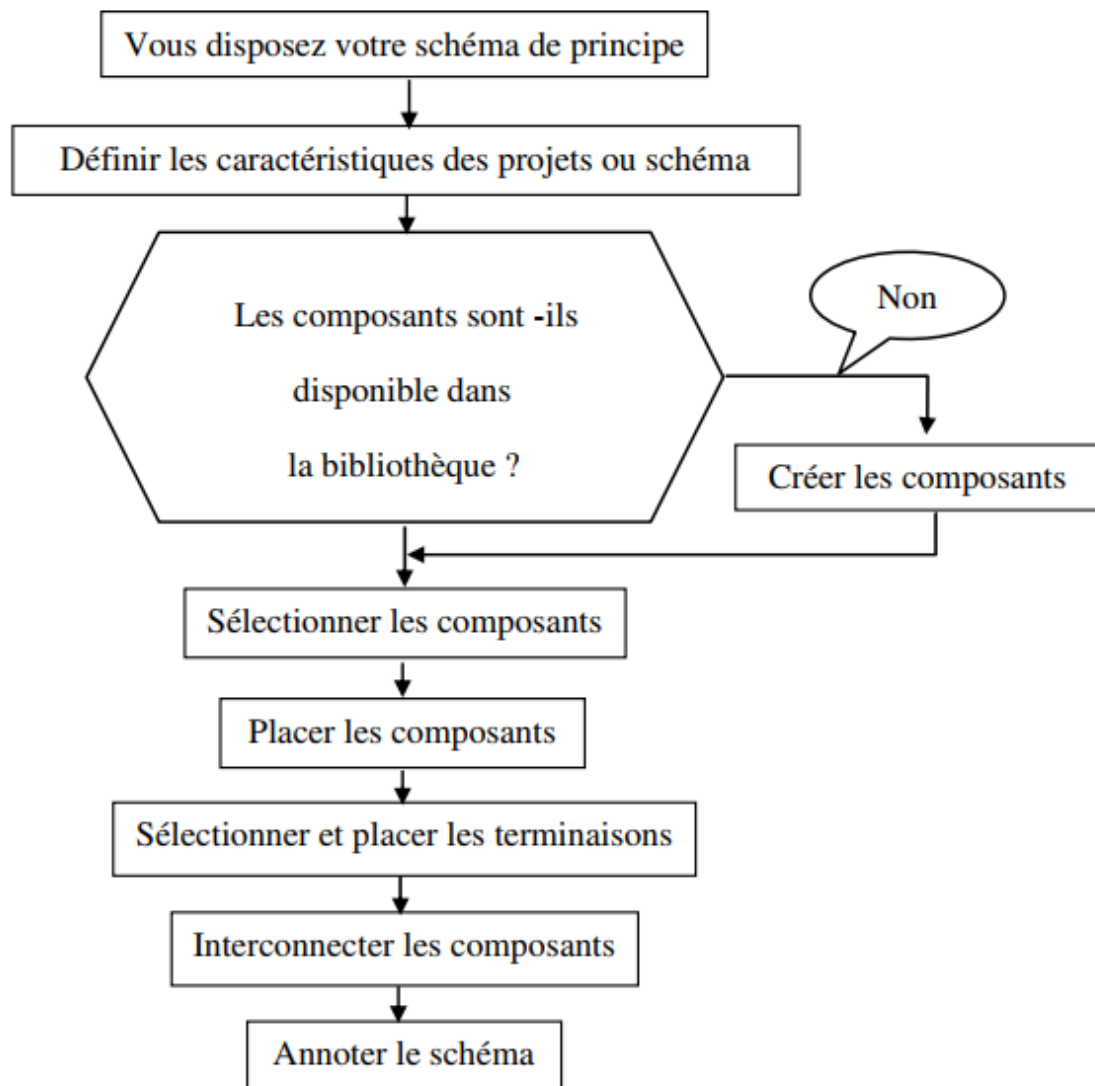
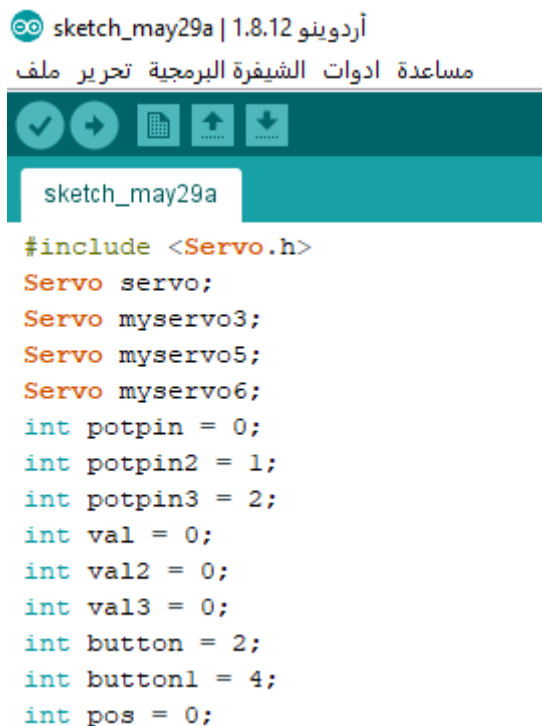


Figure III.4. Organigramme des étapes de la saisie des schémas.

### III.3 Création d'un programme de ce projet

Premièrement on va défini le matériel connecter chaque pièce avec leur pin donc se étape appelé l'étape de définition de les matérielles utiliser



```

sketch_may29a | 1.8.12 أروينو
مساعدة ادوات الشيفرة البرمجية تحرير ملف
sketch_may29a
#include <Servo.h>
Servo servo;
Servo myservo3;
Servo myservo5;
Servo myservo6;
int potpin = 0;
int potpin2 = 1;
int potpin3 = 2;
int val = 0;
int val2 = 0;
int val3 = 0;
int button = 2;
int button1 = 4;
int pos = 0;

```

**Figure III.5** Définition notre programme

Deuxièmes on vas programmer les pin comme entré ou sorti come les buttons et les potentiomètres sons des « input » qui envoyer le signale à l'Arduino et les moteur sons des « output » qui a reçus le signal d'après l'Arduino et écris le valeur qui a recevez

```

void setup()
{
myservo3.attach(9);
myservo5.attach(10);
myservo6.attach(11);
servo.attach(3);
pinMode(button, INPUT_PULLUP);
pinMode(button1, INPUT_PULLUP);
}

```

**Figure III.6** Déclarer nos entrées et sorties (I/O)

Et ça le dernier étapes qui nous donnons les commandes ou bien les ordres par exemple chaque variation dans le potentiomètre provoque une variation dans le moteur mais le buttons poussoir il faut ne relâche pas le buttons pour tourner le moteur

```

void loop()
{
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 180);
  myservo3.write(val);
  //delay(25);
  val2 = analogRead(potpin2);
  val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 180);
  myservo5.write(val2);
  //delay(25);
  val3 = analogRead(potpin3);
  val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 180);
  myservo6.write(val3);
  if (digitalRead(button) == LOW) {
    pos++;
    delay(25);
    servo.write(pos);
  }
  if (digitalRead(button1) == LOW) {
    pos--;
    delay(25);
    servo.write(pos);
  }
}
}

```

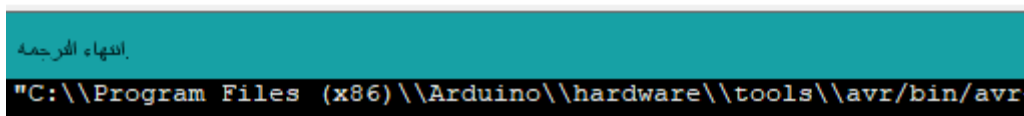


Figure III.7 Appelez nos méthodes dans loop()

## III.4 Réalisation réelle

### III.4.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la robot scara a 4 d.d.l c'est très simple un potentiomètre qui commande dans uns servo moteur ce moteur simuler le mouvement d'un bras spécifique en le servo de la base et servo pour main et de servo pour les autre point de mouvement avec un souplesse de mouvement chaque variations simple dans le potentiomètre provoque une mouvement dans le servo .

### III.4.2 Matérielle utilisé dans ce projet

#### Arduino

Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. Cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par

---

l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne. Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, Arduino permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine. Arduino est un projet en source ouverte : la communauté importante d'utilisateurs et de concepteurs permet à chacun de trouver les réponses à ses questions.

Arduino Uno est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328P. Il possède 14 broches d'entrée / sortie numériques (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sorties PWM), 6 entrées analogiques, un quartz 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation et un bouton de remise à zéro. Il contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur . Comme vous pouvez le constater à l'examen de sa photo visible de, figure.III.8



**Figure III.8** Arduino uno

Microcontrôleur	Atmega328
Tension de fonctionnement	5v
Tension d'alimentation (recommandée )	7-12v
Tension d'alimentation (limites )	6-20v
Broches E/S numériques	14(dont 6 disposent d'une sortie PWM )
Broches d'entrées analogique	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité max disponible par broche E/S (5v)	40mA(ATTENTION : 200 mA cumule pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité max disponible pour la sortie 3.3 v	50 mA
Intensité max disponible pour la sortie 5v	Fonction de l'alimentation utilisée -500 mA max si port USB utilise seul
Mémoire programme Flash	32KB(ATmega328)dont 0.5 KB sont utilisés par le boot loader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2KB(ATmega328)
Mémoire EEPROM(mémoire non volatile)	1KB(ATmega328)
Vitesse d'horloge	16MHz

**Tableau.III.1.** Synthèse des caractéristiques d'Arduino.

✓ **Potentiomètre**

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont un est relié à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.



**Figure III.9 Potentiomètre**

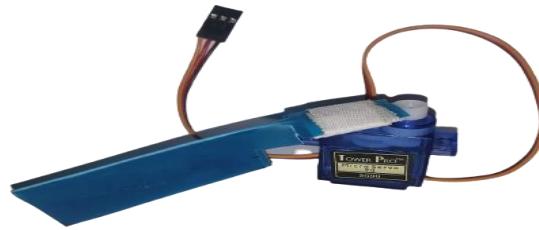
✓ **Button poussoir**



**Figure III.10 Button poussoir**

✓ **3× servo moteur**

Un servomoteur est tout simplement un moteur à courant continu qui est asservi en position à l'aide d'un capteur de position (typiquement un potentiomètre) et un circuit électronique interne au moteur. Ils sont pilotés par un fil de commande et alimentés par deux autres fils, le premier est relié à l'alimentation positive +5 ou +6 V selon le servomoteur, le deuxième est relié à la masse (GND). Le signal de commande est de type modulation de largeur d'impulsion (PWM). En modifiant le rapport cyclique de ce signal, on indique au moteur quelle est la position désirée dans une plage de positions possibles, généralement [0,180°]. La fréquence du signal à modulation de largeur d'impulsion est habituellement de l'ordre de 50 Hz (30 Hz pour certains modèles) avec des impulsions durant de 1 à 2 ms [13] comme illustre la fig.III.11. Certaines plages de mouvement plus importantes peuvent être obtenues en changeant les engrenages du servomoteur .



**Figure III.11** servos moteur

Spécification	Références	SG90
Poids		9g
Couple d'arrêt		1.8 kgf.cm
Tension de fonctionnement		4.8V(5V)
Vitesse		0.1s/60°
Rotation angle		180°

**Tableau III.2.** Paramètres techniques des servomoteurs utilisés.

✓ **Fils de connexion**

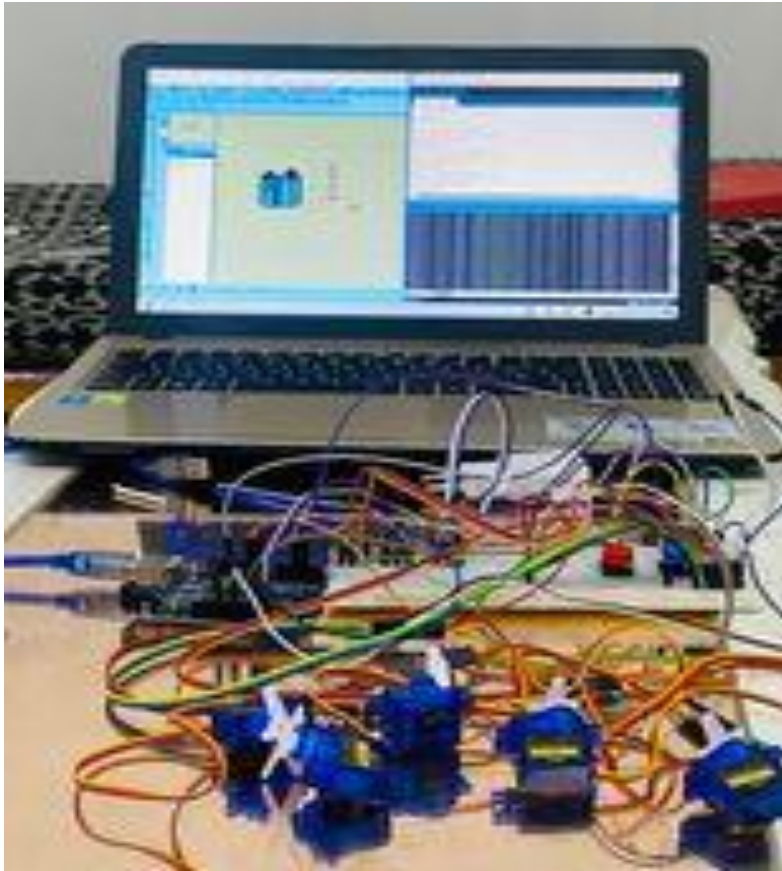
Un fil électrique qui relie les dipôles d'un circuit entre eux. Son rôle est de permettre au courant électrique de circuler entre ces dipôles. Les fils de connexion sont utilisés au collège car ils permettent de réaliser facilement des connexions [14]. Et voilà la figure ci-dessous montre les fils utilisées pour la connexion entre l'Arduino et son environnement.



**Figure III.12.** Fils de connexion.

---

Premièrement on construire le montage de ce robot le même montage qui illustrer dans la simulation



**Figure III.13** montage ouverte de ce robot

Enfin, nous connectons les buttons et les moteurs dans un carcasse qui on construit manuel come le figure suivant :



**Figure III.14** système globale

### III.5. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus nous pouvons constater que ses entrées numériques ont fourni des indications comprises entre 0 et 1023 (valeur différente pour mesurer la tension) avec 10 bits de résolution qui seront converti à l'aide d'un convertisseur N/A en signaux analogiques qui varient entre 0 et 5v.

1. Quand les potentiomètres sont en position de repos l'angle  $\theta$  est constant ne varie pas dans le temps.
2. La valeur de l'entrée analogique diminue :
  - Si l'angle équivalent à la fonction qui calcule la différence entre la valeur lue et la valeur de repos est Inférieur à  $170^\circ \Rightarrow \theta$  diminue si non elle reste constante jusqu'à ce que la condition soit vérifiée
  - Quand  $\theta$  attend la valeur de 10 degrés elle reste constante.
3. la valeur de l'entrée analogique augmente :

---

---

-Si l'angle équivalent à la fonction qui calcule la différence entre la valeur lue et la valeur de repos est supérieure à  $10^\circ \Rightarrow \theta$  augmente si non elle reste constante jusqu'à ce que la condition soit vérifiée

- Quand  $\theta$  atteint la valeur de  $170^\circ$  degrés elle reste constante.

### **III.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons abordé les différents aspects (hardware et software) relatifs à la réalisation de notre projet. Nous avons étudié également les différents composants de notre bras ainsi que la commande du bras manipulateur. Et en fin nous avons présenté les résultats et les tests faits.



# Conclusion générale

## Conclusion Générale

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que : les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). On distingue :

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

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à la modélisation géométrique et cinématique ainsi la réalisation et commande de notre robot. Cette étude nous a permis de développer une stratégie de commande performante pour le robot série .

grâce à nos efforts, nous avons pu que construire un petit exemple pour le robot manipulateur a structure série 4 d d l ,puis nous avons modélisé certains mouvements.



# Bibliographie

## Bibliographe

[I] TAMMA Ilyas .ZOUARI FERHAT Chouaib. NAOUI Abdel Karim. Modélisation et la commande de robot sériel à 3 degré de liberté . master. Electromecanique. Mecanique.science technologique. universite hamma lakhdhar .**2019** . pages **1.2**

[II] ] Laetitia Matignon , Introduction à la robotique ,Université de Caen, France.

[III] Jean-Louis Boimond, Robotique, ISTIA, Université Angers

[1][http://edusol.education.fr/sti/sites/edusol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/5875/5875-la-robotique-industrielle-eduscol-2015\\_0.pdf](http://edusol.education.fr/sti/sites/edusol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/5875/5875-la-robotique-industrielle-eduscol-2015_0.pdf), 2015, date de consultation, mars 2018

[2] [https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds\\_cours\\_robot\\_boimond.pdf](https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds_cours_robot_boimond.pdf)

[3] Robotique. Aspects fondamentaux, J.-P. Lallemand, S. Zeghloul, Masson 1994, 312 pages.

[4] Jean-Louis Boimond « ROBOTIQUE », ISTIA, Université Angers.

[5][https://www.google.fr/webhp?source=search\\_app&gfe\\_rd=cr&ei=lzIQWO WIYv\\_8AeH9o\\_IDg&gws\\_rd=ssl#q=%C3%A9tymologie+du+mot+robotiqu](https://www.google.fr/webhp?source=search_app&gfe_rd=cr&ei=lzIQWO WIYv_8AeH9o_IDg&gws_rd=ssl#q=%C3%A9tymologie+du+mot+robotiqu)

[6] E. Dombre, Analyse et modélisation des robots manipulateurs, 2ème éd. Hermès Sciences, France, 2001

[7] R. Gourdeau, “ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs”, Département de génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010.

[8] Ecole de technologie supérieure, Montréal. Infrastructure. [En ligne]. [Consulté le : 5 avril 2022]. Disponible sur : [https://www.etsmtl.ca/Unites\\_derecherche/CoRo/Infrastructure](https://www.etsmtl.ca/Unites_derecherche/CoRo/Infrastructure)

[9] W. Khalil et E. Dombre “Modélisation identification et commande des robots”, 2e éd. Hermès Sciences, Paris, 1999.

[10] Reignier, Patrick. « Pilotage réactif d'un robot mobile : étude du lien entre la perception et l'action ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG. 1994.

[11] Emelyanov, Levandovsky. « Drift algorithm in control of uncertain processes ». 1986

[12] Arduino. Arduino Uno rev3. [En ligne]. [Consulté le : 6 avril 2022]. Disponible sur : <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

[13] S. BORSALI. “ Polycopié de cours Modélisation des Robots”. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2012

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

[15] Carlos Valente, L'éditeur ISIS. Département génie électrique et informatique industrielle 19100 Brive la gaillarde, Limoges, France, version du 22/09/2005.

[16] Makeblock. Ultimate 2.0 A Robot with Endless Possibility. [En ligne]. [Consulté le : 7 avril 2022] Disponible sur : <https://store.makeblock.com>