REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de la Technologie
Département du génie mécanique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Mécatronique

Robot de type RRP : conception, modélisation et simulation

Présenté par :

MAKHLOUFI Mourad

HERICHE Amir

Proposé et Dirigé par :

Dr. BOUMAHDI Mouloud

Promotion juin 2020

Remerciements

A Monsieur le Docteur BOUMAHDI Mouloud qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail et nous a témoigné sa confiance, reconnaissance sincère pour ses conseils avisés et sa disponibilité et sa patience.

A Monsieur le Docteur ALLICHE Mounir qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de mémoire, hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur REBEHI Ridha qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de mémoire, sincères remerciements.

À tous les amis, la famille et tous ceux qui ont contribué à ce travail

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو تطبيق منهجية لتطوير روبوت يسمى SCARA نوع (RRP دوران، دوران، انتقال .)
يشمل النهج المتبع الخطوات التالية:

1- إعداد النماذج الرياضياتية: الهندسية، الحركية والديناميكية؛
2- تصميم نموذج الروبوت باستخدام برنامج CAD ؛
3- المحاكاة والتحقق من تشغيل النظامين اللذين يشكلان الروبوت، وهما النظام الميكانيكي ونظام التحكم الإلكتروني؛
4- إظهار نتائج المحاكاة

كشفت هذه الدراسة عن فعالية المنهجية المقترحة لتصميم ومحاكاة الروبوت المطور.

الكلمات الرئيسية: روبوتSCARA ، النمذجة الرياضية، CAD، المحاكاة

RÉSUMÉ

Le but de cette étude est la mise en œuvre d'une une méthodologie pour développer un robot SCARA type RRP (rotoïde, rotoïde Prismatique).

La démarche suivie comporte les étapes suivantes :

(i) Etablissement des modèles mathématiques : géométrique, cinématique et dynamique ;
(ii) Conception de la maquette du robot par un logiciel de CAO ;
(iii) Simulation et vérification du fonctionnement des deux systèmes constituant le robot, à savoir, le système mécanique et le système électronique de commande ;
(iv) Afficher les résultats de la simulation

Cette étude a révélé l'efficacité de la méthodologie proposée pour la conception et la simulation du robot développé.

Mots clés : Robot SCARA, modélisation mathématique, CAO, simulation

ABSTRACT

The aim of this study is the implementation of a methodology for developing a robot called SCARA robot type RRP (Rotoid, Rotoid and Prismatic) is proposed. The process involves the following steps:

(i) Establishment of mathematical models: geometric, kinematic and dynamic;
(ii) Design of the robot model using CAD software;
(iii) Simulation and verification of the operation of the two systems constituting the robot, namely, the mechanical system and the electronic control system;
(iv) Show simulated results

This study showed the effectiveness of the proposed methodology for the design and simulation of the developed robot.

Key words: SCARA robot, mathematical modeling, CAD, simulation.

NOMENCLATURE

$\mathbf{a_i}$: (Link length) (mm).

C (q, $\dot{q}$, F_{ext} , L_{ext}, g) ; Les termes gyroscopiques de Coriolis et les forces couples extérieures appliquées sur le corps ainsi que la gravité.

$\mathbf{d_i}$: (Joint distance)

ddl : degré de liberté .

D-H : Paramétrage de Denavit_Hartenberg.

$\mathbf{F_{ext}}$; forces extérieures(N).

g : forces de gravité

$\mathbf{H_i}$**:** Matrice des pseudo-inerties du corps i

$\mathbf{I^G}$: Tenseur d'inertie du corps, par rapport à son centre de masse

J (q) : matrice jacobéenne

K : Énergie cinétique totale du robot (J).

L : lagrangien du système

$\mathbf{L_{ext}}$**:** couples extérieurs

M(q) : Matrice de masse généralisée du système.

$\mathbf{m_i}$: Masse du corps i de la chaîne cinématique.

$\mathbf{m^i}$ **r** : Premier moment du corps i autour de i o exprimé dans R_i

$\mathbf{m_i}$: La masse du lien i (Kg)

OT : organe terminale.

$\mathbf{P_x}$: La position désirée selon l'axe (x)

$\mathbf{P_y}$: La position désirée selon l'axe (y)

$\mathbf{P_y}$: La position désirée selon l'axe (z)

Q : les couples appliqués. (N*m)

(**q,$\dot{q}$, $\ddot{q}$)** : la position, les vitesses et les accélération des variables articulaires.

$\mathbf{R_i}$: Repère du lien i.

$\mathbf{R_0}$: Repère globale

$^{\mathbf{i}}\mathbf{r}$**:** Vecteur du centre d'inertie du corps i exprimé dans le repère i R

$^{\mathbf{i}}\mathbf{S_i}$: Position du centre de masse du corps i exprimée en R_i

$\mathbf{T_i^{i-1}}$**:** Matrice de transformation homogène

V : Énergie potentielle totale du robot (J)

(x, y , z) : Les axes des liens dans un repère orthogonal.

$\dot{\mathbf{X}}$: vitesses dans l'espace opérationnel (m/sec).

$\boldsymbol{\alpha_i}$: (Link twist)(mm)

$\boldsymbol{\theta_i}$**:** Le déplacement angulaire du lien i (rad)

$\boldsymbol{\dot{\theta}_i}$: La vitesse angulaire du lien i (rad/sec)

$\boldsymbol{\ddot{\theta}_i}$: L'accélération angulaire du lien i (rad/sec**2)

$\boldsymbol{\lambda}$: Vecteur des multiplicateurs de Lagrange.

$\boldsymbol{\omega}$: Vecteur vitesse angulaire du corps

$\boldsymbol{\tau_i}$**:** Le couple de l'articulation i (N.m)

Listes des figures :

Figure 1.1: le premier robot mobile autonome [1] 14
Figure 1.2: robot (UNIMATE & PUMA) [2] 15
Figure 1.3: robots (sojourner et aibo) [2] 16
Figure 1.4: Robot Curiosity et Robot Spirit [2] 16
Figure 1.5:Robot Nao 17
Figure 1.6: Constituants mécaniques des robots [3] 17
Figure 1.7: Structure fonctionnelle d'un robot [2] 19
Figure 1.8: structure d'un robot cartésien [6] 21
Figure 1.9 : Structure d'un robot cylindrique [6] 21
Figure 1.10: Structure d'un robot sphérique [6] 21
Figure 1.11 : Structure d'un robot SCARA [5] 22
Figure 1.12: Structure d'un robot 3R [6] 22
Figure 1.13 : liaison linéaire 24
Figure 1.14 : Articulation orthogonale 24
Figure 1.15: liaison de rotation 25
Figure 1.16 : liaison de torsion 25
Figure 1.17 : liaison tournante 25
Figure 2.1 : Transformation des repères.[7] 32
Figure 3.2: Robot à structure ouverte simple [8] 33
Figure 2.3: paramètre géométrique dans le cas d'une structure ouvert simple [7] 34
Figure 2.4 : Robot SCARA RRP. « Repérage » 41
Figure 2.5: Répartition des masses 46
Figure 3.1 : Maquette du robot scara RRP 52
Figure 3.2 : vérification le mouvement du robot avec solidworks Animation 52
Figure 3.3: Les fonctions de simmecahnics 53
Figure 3.4: sous bibliothèque corps 54
Figure 3.5 : sous bibliothèque articulations 54
Figure 3.6 : Export le robot vers Simulink 54
Figure 3.7 : résultat du code M (programme pour commande) pour simulation le robot scara ... 55
Figure 3.8 : schéma block du Simulation du mouvement du robot 56
Figure 3.9 : simulation du robot Controller avec programme 'code M' (from woeorkspace 57
Figure 3.10 : variation de l'ange du première articulation R1en fonction le temps 58
Figure 3.11: variation de couple de la première articulation R1 58

Figure 3.12 : variation de l'ange du deuxième articulation R2 59
Figure 3.13: variation de couple de la deuxième articulation R2 59
Figure 3.14 : variation de position du troisième articulation P3 60
Figure 3.15 : variation de la force du troisième articulation P3 60
Figure 3.16 : interface du logiciel Proteus 8 Profissional 61
Figure 3.17 : l'interface de l'Arduino IDE(https://www.arduino.cc/en/Main/Software) 64
Figure 3.18 : Moteur pas à pas, type 28BJY-48 65
Figure 3.19 : ULN2003 driver pour Controller les moteurs pas à pas 65
Figure 3.20 : lien de code de contrôle. 66
Figure 3.21 : configuration de la carte Arduino 66
Figure 3.22: simulation électrique du circuit électronique 67

Liste des tableaux

Tableau 3-1. Paramètres Denavit-Hanterberg du robot « paramétrage »..... 41
Tableau A-1 . Caractéristique de la carte Arduino mega 2560 72

La table des matières

1 INTRODUCTION GENERALE SUR LA ROBOTIQUE 12
1 CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ROBOTS 13
1.1 Introduction 13
1.2 Définition 13
1.2.1 L'origine de terme 13
1.2.2 Définition d'un robot industriel 14
1.3 Historique de la robotique 14
a. Avant 1950 [1] 14
b. 1950-1960 [1] 14
c. Robotique industrielle 1950-1970 [1] 15
d. Robots mobiles 15
e. Essor de la robotique mobile 1990-2000 15
f. Depuis -2000- Robots d'exploration et démocratisation des robots 16
1.4 Constituants mécaniques des robots 17
1.4.1 L'organe terminale 18
1.4.2 Structure mécanique articulée 18
1.4.3 Articulations 18
1.5 Les éléments constitutifs d'un robot 18
1.5.1 Unité informationnelle 19
1.5.2 Unité opérationnelle 19
1.6 Classification des robots 20
1.6.1 Degrés de liberté 20
1.6.2 Géométrie de l'espace de travail 20
1.6.2.1 Structure cartésienne (PPP) 20
1.6.2.2 La structure cylindrique (RPP)ou (PRP) 21
1.6.2.3 La structure sphérique ou polaire a axe de rotation orthogonale 21
1.6.2.4 La structure dite SCARA 22
1.6.2.5 La structure 3R (anthropomorphe) 22
1.6.3 Caractéristiques du mouvement 23
1.6.4 Technologie d'entraînement 23
1.6.5 Structure cinématique 23
1.6.6 Types des liaisons de robot 23
1.6.7 Liaison linéaire 24
1.6.8 Articulation orthogonale 24

1.6.9 Liaison de rotation 25
1.6.10 Liaison de torsion 25
1.6.11 Liaison tournante 25
1.7 Manipulateurs de robots 26
1.7.1 Manipulateurs en série 26
1.7.2 Manipulateurs en parallèles 27
1.7.3 Manipulateurs hybrides 27
1.8 Moteurs et actionneurs 28
1.8.1 Entraînement électrique 28
1.8.2 Entraînement hydraulique 29
1.8.3 Entraînement pneumatique 29
1.8.4 Robots à entraînement direct 29
1.9 Conclusion 30
2 Chapitre 2 : Modélisation du robot SCARA, Type RRP 31
2.1 Introduction 31
2.2 Description géométrique [7] 32
2.2.1 Paramétrage géométrique 32
2.3 Modélisation géométrique 34
2.3.1 Modélisation géométrique direct 35
2.3.2 Modélisation géométrique inverse 35
2.4 Modélisation cinématique 36
2.4.1 Modélisation cinématique direct 36
2.4.2 Modèle cinématique inverse 37
2.5 Modélisation dynamique 37
2.5.1 Modélisation dynamique inverse 37
2.5.1.1 Formalisme de Lagrange 38
2.5.1.2 Formalisme de Newton-Euler [8] 40
2.5.2 Modélisation dynamique directe 40
2.6 Modélisation du robot SCARA type RRP 41
2.6.1 Relations géométriques 41
2.6.2 Calcul du modèle géométrique direct 42
2.6.3 Calcul du modèle géométrique inverse 42
2.6.4 Calcul du modèle cinématique directe 44
2.6.5 Calcul du modèle Cinématique inverse 45
2.6.6 Calcul du modèle dynamique selon le formalisme de Lagrange 46
2.6.7 Calcul de l'énergie cinétique Ec : 47
2.6.8 Calcul de l'énergie potentielle Ep 48

2.6.9 Calcul de Lagrangien : 48
2.7 Conclusion : 50
3 Chapitre 3 : Conception et simulation du robot SCARA, RRP 51
3.1 Introduction 51
3.2 Conception de la maquette avec Solidworks 51
3.2.1 SOLIDWORKS : 51
3.3 Simulation du mouvement avec simmechanic de MATLAB 53
3.3.1 SIMMECHANICS (simscape multibody) de simulink MATLAB 53
3.3.1.1 La bibliothèque de Simmecahnics 53
a. Corps (body) 53
b. Les articulation (joints) 54
3.4 Simulation circuit électrique du système de commande des moteurs 61
3.4.1 Logiciel protes 8 61
3.5 Système de commande électronique 62
La carte Arduino 62
3.5.1.1 Arduino mega 2560 : 62
3.5.1.2 Le microcontrôleur 63
3.5.1.3 Les avantage de la carte Arduino 63
3.5.1.4 Logiciel de programmation d'ARDUINO (Arduino IDE) 63
3.5.2 Les actionneurs 64
3.5.2.1 Moteurs pas à pas 64
3.6 Conclusion : 68
4 Conclusion générale 69
5 70
6 Références bibliographiques 70
7 Annexe 71
A.1 Les caractéristiques de la carte Arduino (Arduino Mega 2560) 72
A.3 Contrôlez directement le robot avec MATLAB 79

INTRODUCTION GENERALE SUR LA ROBOTIQUE

À l'époque où nous vivons, les robots envahissent les différents domaines de l'activité humaine. On trouve des applications dans les domaines de :

- La robotique industrielle,
- La robotique domestique,
- La robotique médicale,
- La robotique militaire.

Un robot peut être défini comme un appareil effectuant, grâce à un système de commande automatique à base de micro-processeur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu dans le domaine industriel, scientifique ou domestique. Il peut effectuer la plupart des actions humaines avec une plus grande efficacité, une plus grande vitesse, une plus grande précision et moins de coûts. De cette définition, il découle deux interprétations : la première est de voir le robot comme une machine, qui possède des capteurs, un système logique et des actionneurs. La deuxième laisse penser qu'un robot peut aussi être virtuel.

L'objectif de la présente étude est de développer un robot de type Scara (Selective Compliance Arm for Robotic Assembly) à trois degrés de libertés RRP. Cette étude est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur le domaine de la robotique et ses applications.

Le Deuxième chapitre présente les modèles mathématiques utilisés pour décrire le mouvement des articulations du robot : (géométrique, cinématique et dynamique).

Dans le dernier chapitre, la conception et la simulation du robot ciblé seront décrites en détail.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ROBOTS

1.1 Introduction

La robotique est la branche de la technologie qui traite de la conception, de la construction, du fonctionnement et de l'application des robots, ainsi que des systèmes informatiques pour leur contrôle, la rétroaction sensorielle et le traitement de l'information.

Ces technologies traitent de machines automatisées qui peuvent remplacer les humains dans des environnements ou des processus de fabrication dangereux, ou ressembler à des humains en apparence, en comportement et / ou en cognition. Beaucoup de robots d'aujourd'hui sont inspirés par la nature contribuant au domaine de la robotique bio-inspirée.

Le concept de créer des machines qui peuvent fonctionner de manière autonome remonte à l'époque classique, mais la recherche sur la fonctionnalité et les utilisations potentielles des robots n'a pas grandi considérablement jusqu'au 20 siècle.

Tout au long de l'histoire, la robotique a souvent été considérée comme imitant le comportement humain et gérant souvent des tâches de la même manière.

Aujourd'hui, la robotique est un domaine en croissance rapide, alors que les progrès technologiques se poursuivent, la recherche, la conception et la construction de nouveaux robots servent à diverses fins pratiques, que ce soit au niveau national, commercial ou militaire.

De nombreux robots effectuent des travaux dangereux pour les humains, tels que le désamorçage de bombes, de mines et l'exploration de naufrages.

Dans ce chapitre, nous présentons une description générale de la robotique, un bref historique sur l'évolution de la robotique industrielle et un aperçu non exhaustif sur la classification et les constituants des robots.

1.2 Définition

1.2.1 L’origine de terme

Robot" a été utilisé pour la première fois en 1921 par “**Karel Capek**“ dans **R.U.R**. (**Rossums Universal Robots**).
Il provient du tchèque "robota" qui signifie corvée, travail obligatoire. Le terme robotique a été employé pour la première fois par Asimov en 1941.[1]

1.2.2 Définition d'un robot industriel

La **robotique industrielle** est officiellement définie par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) comme étant un système commandé automatiquement, multi-applicatif, reprogrammable, polyvalent, manipulateur et programmable sur trois axes ou plus.

Les applications typiques incluent les robots de soudage, de peinture et d'assemblage. L'avantage de la robotique industrielle est sa rapidité d'exécution et sa précision ainsi que la répétition de cette précision dans le temps.

Les robots industriels sont très utilisés dans le secteur de l'automobile. Leur conception nécessite une bonne connaissance technique et un très haut niveau dans le domaine de l'ingénierie.

1.3 Historique de la robotique

a. Avant 1950 [1]

XVIII éme siècle : création d'automates. En 1738, Jacques Vaucanson crée un canard articule en cuivre capable de boire, manger, cancaner et digérer comme un véritable animal.

1921 : Karel Capek, RUR (Rossums Universal Robots).

1940 : Isaac Asimov écrit un ensemble de nouvelles sur les robots. Trois lois de la robotique.

b. 1950-1960 [1]

1948 : Grey Walter invente le premier robot mobile autonome, une tortue se dirigeant vers les sources de lumiere qu'elle perçoit. Cependant, ce robot n'est pas programmable.

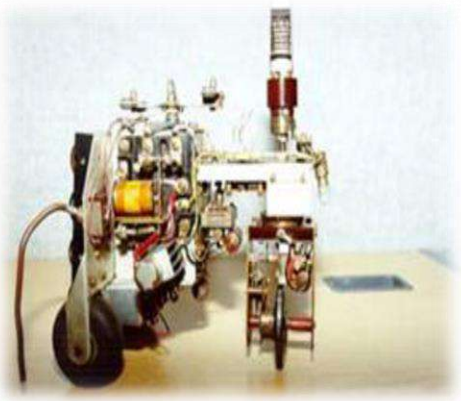


Figure 1.1: le premier robot mobile autonome [1]

c. Robotique industrielle 1950-1970 [1]

1961 : Premier robot industriel mis en place dans une usine de General Motors : UNIMATE (tubes cathodiques de télévision)

1972 : Nissan ouvre la première chaîne de production complétement robotisée.

1978 : PUMA (Programmable Universel Machine for Assembly) développé par General Motors (toujours Utilise)

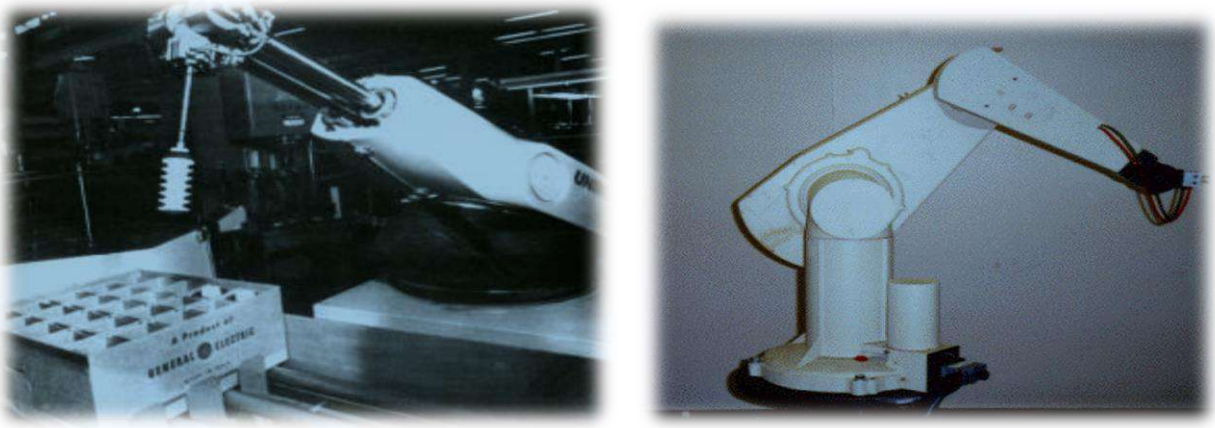


Figure 1.2: robot (UNIMATE & PUMA) [2]

d. Robots mobiles

1960-1964 : Ouverture des laboratoires d'Intelligence Artificielle au M.I.T., Stanford Research Institute (SRI), Stanford University, University of Edinburgh [2].
Fin des années 60 : Mise en place de "Shakey" premier robot mobile intégrant Perception, planification et Exécution [2].

1970 : Standford Cart.
1977 : premier robot mobile français HILARE au LAAS (CNRS Toulouse).

1980-1990 : Développement important de l'intelligence artificielle et de la robotique : de nouveaux robots apparaissent constamment [2].
Essor de la robotique mobile

e. Essor de la robotique mobile 1990-2000

1992 : Mise en place de la compétition annuelle AAAI sur la robotique mobile.
1995 : Mise en place de la RoboCup.
1997 : premier robot mobile extra planétaire sur Mars.
1999 : Lancement d'Aibo.

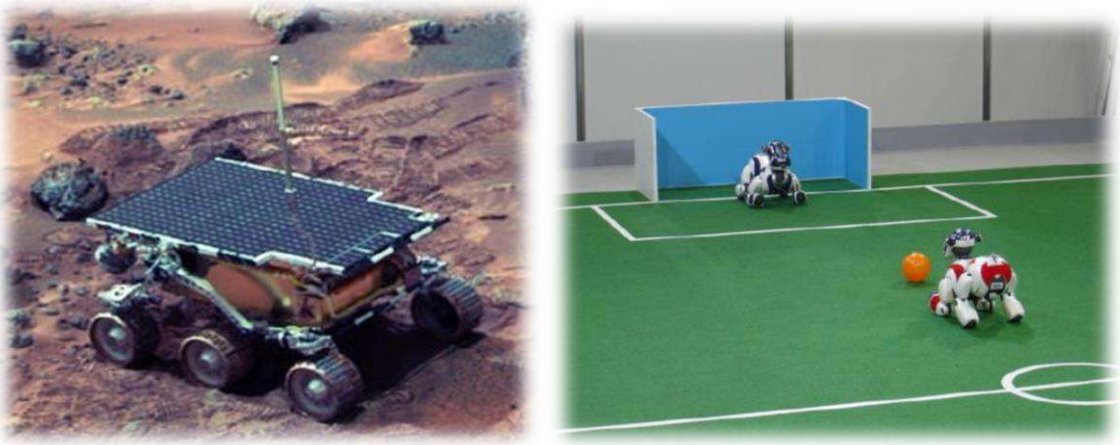


Figure 1.3: robots (sojourner et aibo) [2]

f. Depuis -2000- Robots d'exploration et démocratisation des robots

2003 : Projet "Mars Exploration Rover" (Spirit & Opportunity) [2].

2009 : Projet "Mars Science Laboratory" succedant au projet Rover, envoi prévu de Curiosity fin 2011.



Figure 1.4: Robot Curiosity et Robot Spirit [2]

2000 : Lancement d'Asimo.

Diversification des compétitions de robotique.

Utilisation de drones en situation réelle (Irak...).

2006 : le projet Aibo n'est plus assez rentable, fin de la production.

2009 : robot Nao utilise a la Robocup Soccer [2].



Figure 1.5:Robot Nao

1.4 Constituants mécaniques des robots



Figure 1.6: Constituants mécaniques des robots [3]

1.4.1 L’organe terminale

Sous le terme organe terminal, on regroupe tous dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression …) ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture…). Il permet au robot d’interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, c’est-à- dire qu’il est équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes [3].

1.4.2 Structure mécanique articulée

Le rôle de la structure mécanique articulée est d’amener l’organe terminal dans une situation (position et orientation) désirée, selon des caractéristiques de vitesse et d’accélération prédéterminées. Son architecture est une chaine cinématique de corps, généralement rigides ou supposée comme tels, assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaines peuvent être soit ouvertes simples, soit arborescentes, soit fermées [3].

1.4.3 Articulations

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté de l’un par rapport à l’autre. Soit m le nombre de degrés de liberté résultant de la mobilité de l’articulation. La mobilité est telle que : $1< m \leq 6$

Lorsque m = 1, ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l’articulation est dite simple, soit rotoïde, soit prismatique [3].

1.5 Les éléments constitutifs d’un robot

La structure fonctionnelle d’un robot comporte une unité dite informationnelle et une unité dite opérationnelle (voir figure 2.7).

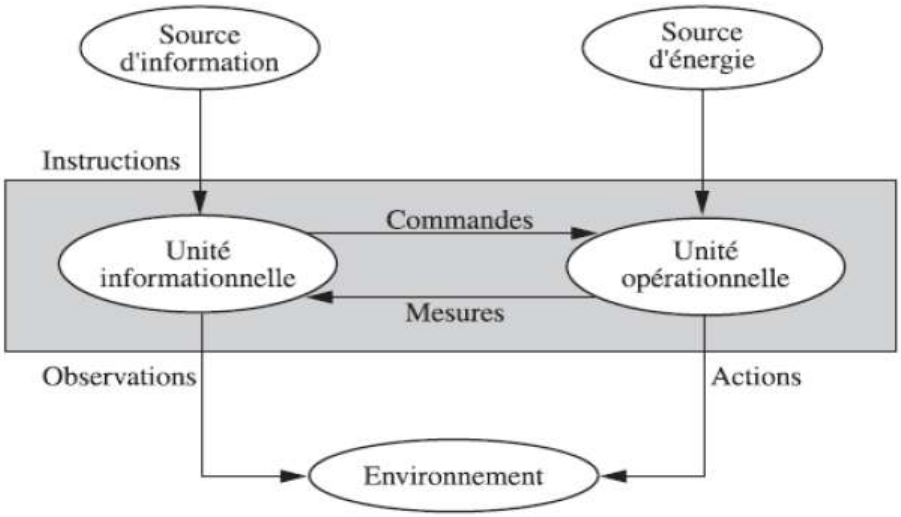


Figure 1.7: Structure fonctionnelle d'un robot [2]

1.5.1 Unité informationnelle

L'unité informationnelle reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras manipulateur et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de ses tâches. Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanente selon le cycle information décision- action [2]**.**

1.5.2 Unité opérationnelle

L'unité opérationnelle exerce les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. Cette partie, qui constitue le robot physique, intègre la structure mécanique (segments, articulations, architecture,…), les modules d'énergie (amplificateurs, variateurs, servovalves....), les convertisseurs d'énergie (moteurs, Vérins….), les chaines cinématiques de transmission mécanique (réducteurs, vis à billes, courroies crantées ….), les capteurs de proprioceptifs placés sur chaque axe pour mesurer en permanence leur position et leur vitesse, et enfin l'effecteur, ou organe terminal, qui est en interaction avec l'environnement [2].

1.6 Classification des robots

Les robots peuvent être classés en fonction de leurs degrés de liberté, espace de travail de géométrie, caractéristiques de mouvement, technologie d'entraînement et structure cinématique.[4]

1.6.1 Degrés de liberté

Les degrés de liberté dans un contexte mécanique, sont des modes spécifiques définis dans lesquels un dispositif mécanique ou un système peut se déplacer. Le nombre de degrés de liberté est égal au nombre total de déplacements indépendants ou d'aspects du mouvement. Une machine peut fonctionner dans deux ou trois dimensions mais avoir plus de trois degrés de liberté.

1.6.2 Géométrie de l'espace de travail

L'espace de travail du robot est la capacité d'un robot à atteindre une collection de points (espace de travail) qui dépend de la configuration et de la taille de leurs liens et poignets mixte. L'espace de travail peut être trouvé mathématiquement en écrivant des équations définissant articulations du robot, y compris leurs limitations, telles que les plages de mouvements chaque joint. On peut aussi trouver l'alternative en soustrayant tout l'espace qu'elle peut atteindre avec ce qu'il ne peut pas atteindre.

1.6.2.1 Structure cartésienne (PPP)

A trois liaisons prismatiques, est la plus ancienne, historiquement, elle découle logiquement de la conception traditionnelle d'une machine-outil a trois axes, type rectifieuse ou fraiseuse par exemple. Cette structure est relativement peu utilisée, sauf dans quelques applications particulières : robots pratiques, robot de magasinage, par exemple [5]



Figure 1.8: structure d'un robot cartésien [6]

1.6.2.2 La 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



Figure 1.9 : Structure d'un robot cylindrique [6]

1.6.2.3 La structure sphérique ou polaire a axe de rotation orthogonale

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



Figure 1.10: Structure d'un robot sphérique [6]

1.6.2.4 La structure dite SCARA

Axes de rotation parallèles est l'un des plus utilisées, en particulier pour des taches 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 taches.[5]

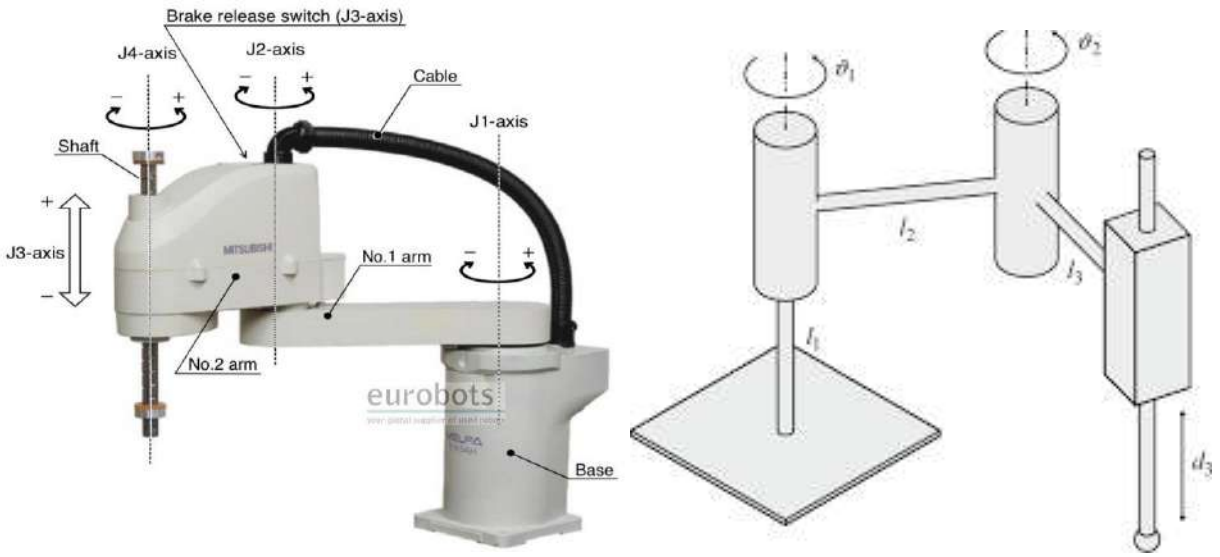


Figure 1.11 : Structure d'un robot SCARA [5]

1.6.2.5 La structure 3R (anthropomorphe)

Permet d'amener un solide en un point de l'espace par trois rotations, généralement une a axe vertical et deux a axes horizontaux et parallèles c'est le porteur généraliste par excellence, pouvant se programmer facilement pour différent types de tache et disposant d'un volume de travail conséquent.[5]



Figure 1.12: Structure d'un robot 3R [6]

1.6.3 Caractéristiques du mouvement

Si un robot manipulateur possède un « mécanisme plan », il est défini comme « manipulateur planaire ». Il manipule un objet sur un plan. Si un robot manipulateur possède un « mécanisme sphérique », il est défini comme un « manipulateur sphérique ». En outre, si le mouvement d'un corps rigide ne peut pas être défini comme un mouvement plan ou sphérique, le mouvement éventuellement défini comme « mouvement spatial ». Si au moins un des liens mobiles d'un mécanisme fait un mouvement spatial général, donc le manipulateur est défini comme « manipulateur spatial ». [4]

1.6.4 Technologie d'entraînement

Bien qu'il existe trois technologies d'entraînement principales telles que l'électrique, l'hydraulique et pneumatiques, la plupart des robots manipulateurs utilisent des servomoteurs électriques ou des moteurs pas à pas, au fait que les avantages des moteurs électriques sont plus évidents. L'entraînement hydraulique et pneumatique présente certains avantages, tels que le transport des charges élevées [4].

1.6.5 Structure cinématique

Les robots sont également classés selon leurs structures cinématiques. Si un robot a une structure cinématique de chaîne ouverte, il est défini comme "robot série". Et s'il possède une structure cinématique de chaîne fermée, il est défini comme parallèle. De plus, si un système de robot est constitué des deux types de structure, il est appelé comme « manipulateur hybride ».[7]

1.6.6 Types des liaisons de robot

L'articulation a pour but de permettre un mouvement relatif contrôlé entre le lien d'entrée et le lien de sortie. Presque tous les robots industriels ont des liaison joints mécaniques qui peuvent être classé dans l'un des cinq types. Ils comprennent deux types qui fournissent un mouvement linéaire et trois types qui fournissent un mouvement rotatif. Chacune des articulations ont une gamme sur lequel il peut être déplacé [4].

1.6.7 Liaison linéaire

Le mouvement relatif entre le lien d'entrée et le lien de sortie est linéaire. Mouvement de glissement, les axes des deux liens étant parallèles.[7]

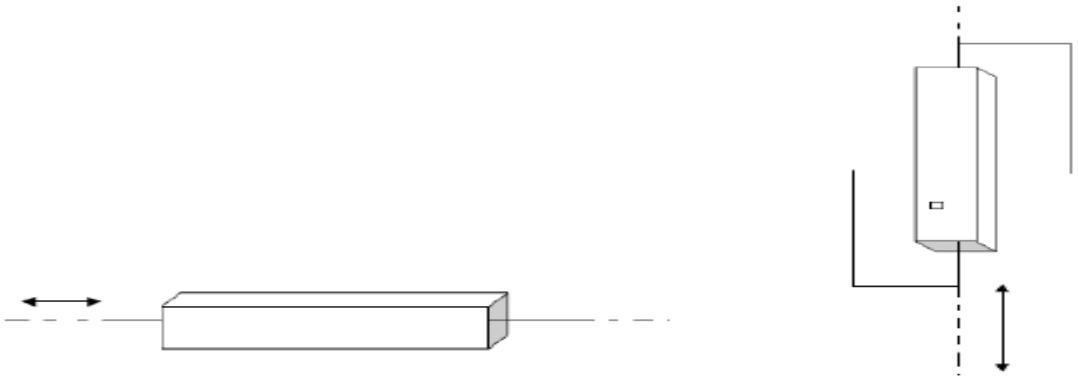


Figure 1.13 : liaison linéaire

1.6.8 Articulation orthogonale

C'est aussi un mouvement de glissement linéaire, mais les liens d'entrée et de sortie sont perpendiculaires les uns aux autres pendant le déménagement.[7]

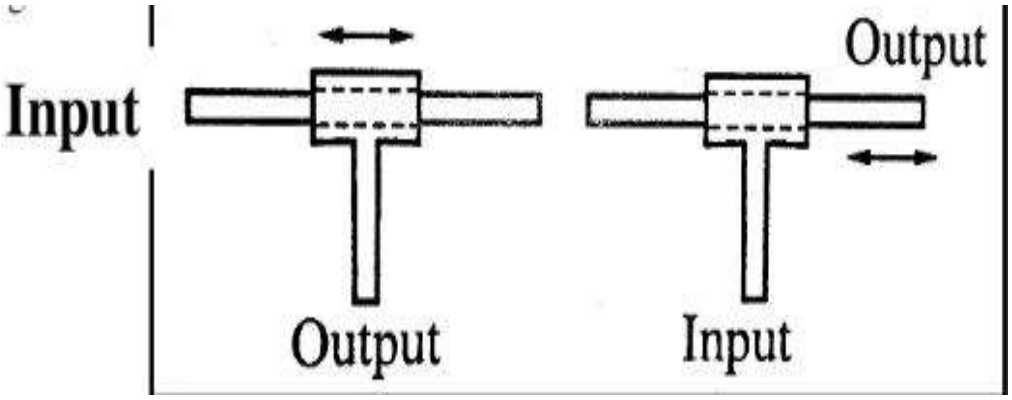


Figure 1.14 : Articulation orthogonale

1.6.9 Liaison de rotation

Ce type permet un mouvement relatif de rotation des articulations, avec l'axe de rotation perpendiculaire aux axes des liaisons d'entrée et de sortie. [7]

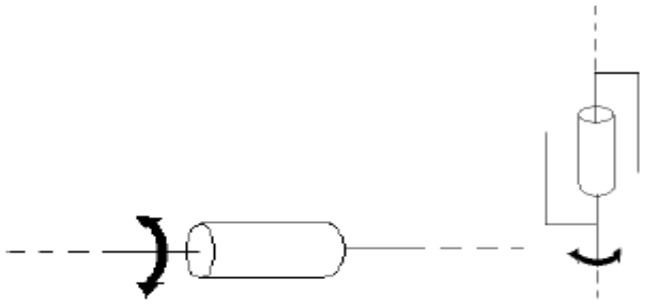


Figure 1.15: liaison de rotation

1.6.10 Liaison de torsion

Cette articulation implique également un mouvement de rotation, mais l'axe de rotation est parallèle aux axes des deux liens. [7]

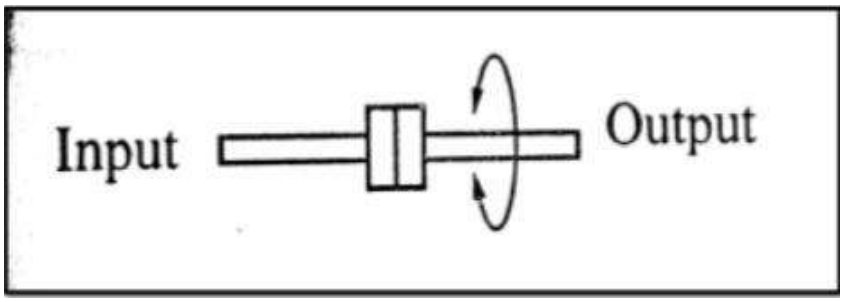


Figure 1.16 : liaison de torsion

1.6.11 Liaison tournante

Dans ce type, l'axe de la liaison d'entrée est parallèle à l'axe de rotation de l'articulation, et l'axe de la liaison de sortie est perpendiculaire à l'axe de rotation. [7]

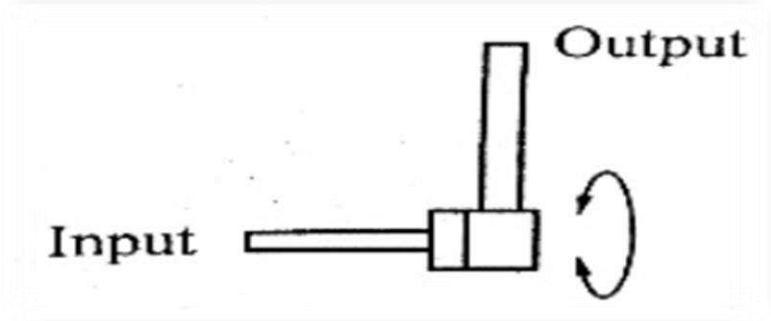


Figure 1.17 : liaison tournante

1.7 Manipulateurs de robots

Un robot manipulateur est un mécanisme, généralement constitué d'une série de segments, articulés ou coulissants les uns par rapport aux autres, pour déplacer des objets. Il existe trois types principaux des manipulateurs de robot. Ce sont des manipulateurs en série, parallèles et hybrides [4].

1.7.1 Manipulateurs en série

Manipulateurs en série constitués d'une série de liens rigides reliés entre eux par les joints sont les robots industriels les plus courants. Leurs articulations sont généralement articulaires révolutionnaires.

La plupart des manipulateurs en série ont une structure de bras anthropomorphique. Cela signifie qu'ils ont « épaule » (deux premières articulations), un « coude » (troisième articulation) et un « poignet » (dernière trois articulations). Selon le mouvement du corps rigide, placer un objet manipulé dans une position et orientation arbitraires dans l'espace de travail du robot, un robot doit avoir au moins six degrés de liberté.

Par conséquent, la plupart des robots de série ont six joints. Sur d'autre part, robot SCARA qui est l'un des robots les plus courants n'a que quatre degrés de liberté. C'est un robot d'assemblage spécial et utilisé généralement dans des applications « pick and place ».[7]

- **Avantages d'un manipulateur en série**
  - Plus grand espace de travail.
  - Simplicité des cinématiques de vitesse et de positions.
  - Capable d'atteindre des vitesses et des accélérations élevées.

- **Inconvénients des manipulateurs en série**
  - Les erreurs sont accumulées et amplifiées.
  - Pas économe en énergie.

1.7.2 Manipulateurs en parallèles

Constitué d'une partie fixe (base) et d'une partie mobile (effecteur terminal).
La plate-forme est un mécanisme à chaîne fermée. La plateforme de base est connectée à l'effecteur final par un certain nombre de « jambes ». Ces jambes sont reliées aux plateformes par joints sphériques ou universels. Chaque jambe est contrôlée par un actionneur. Le degré de la liberté dépend du nombre de jambes actionnées.
Les avantages les plus importants des manipulateurs parallèles sont les capacités de positionnement précises et des constructions légères parce que les liens ne ressentent que la traction ou la compression, pas de flexion. En plus que, les actionneurs peuvent être placés dans la plate-forme de base, d'où le poids de la construction mobile diminue. [7]

- **Avantage d'un manipulateur parallèle**
  - Rigidité structurelle et capacité de charge élevées.
  - Capacité de mouvement à large bande passante.
- **Inconvénients d'un manipulateur parallèle**
  - Espace de travail limité.
  - Perdre complètement la rigidité au singulier.

1.7.3 Manipulateurs hybrides

Si des fonctionnalités telles que la précision, la vitesse élevée, la rigidité sont nécessaires pour un robot, les manipulateurs parallèles deviennent le premier choix de cette application.

Cependant, les robots industriels ont généralement des manipulateurs en série à cinématique ouverte. Chaîne parce que l'espace de travail des manipulateurs parallèles est très limité et ce travail l'espace n'est pas suffisant pour de nombreuses applications Comme les manipulateurs parallèles et série présentent des avantages différents, le type manipulateur hybride combine ces deux manipulateurs et possède des fonctionnalités de série et manipulateurs parallèles.

En outre, les manipulateurs hybrides surmontent les limites espace de travail des manipulateurs parallèles. Les manipulateurs hybrides sont constitués généralement d'un manipulateur en série et un en parallèle ou de deux manipulateurs en parallèle. La chaîne cinématique d'un manipulateur hybride est composée de deux manipulateurs parallèles différents. Les manipulateurs hybrides peuvent également être utilisés pour augmenter le degré de la liberté du système. [7]

1.8 Moteurs et actionneurs

Chaque articulation du manipulateur est actionnée par un actionneur. Les actionneurs sont des dispositifs qui faire bouger le robot. Les systèmes d'entraînement d'un robot déterminent :

- La capacité de bouger son corps
- La vitesse de fonctionnement
- La force
- Performance dynamique
- Et les types d'applications avec lesquelles le robot peut être utilisé.

Pour la plupart des robots industriels, les actionneurs sont couplés au lien de robot correspondant par un train d'engrenage. L'effet de la réduction de vitesse est en grande partie de découpler le système en réduisant le couplage entre les articulations. Cependant, la présence des engrenages introduit la friction, le jeu et la conformité de la transmission.

Pour les robots à entraînement direct, le les problèmes de jeu, de friction et de conformité dus aux engrenages sont éliminés car aucun des engrenages sont utilisés dans un tel robot. Cependant, le couplage non linéaire entre les liens est significatif, et la dynamique des actionneurs eux-mêmes peut être beaucoup plus complexe.

Les actionneurs couramment utilisés sont

1. **Moteurs pas à pas**
2. **Servomoteurs CC**
3. **Servomoteurs AC**
4. **Pistons hydrauliques**
5. **Pistons pneumatiques**

De loin, les entraînements hydrauliques et électriques sont les plus couramment utilisés sur robots sophistiqués [4].

1.8.1 Entraînement électrique

Les robots de petite et moyenne taille sont généralement alimentés par des entraînements électriques via des engrenages trains utilisant des servomoteurs et des moteurs pas à pas. Les plus couramment utilisés sont les moteurs à courant continu, bien que pour les robots plus grands, les moteurs à courant alternatif peuvent être utilisés. [7]

- **Avantage**

- Meilleure précision et répétabilité
- Nécessite moins d'espace au sol
- Plus vers des travaux précis tels que des applications d'assemblage

- **Désavantages**

- Généralement pas aussi rapide et puissant que les robots hydrauliques
- Cher pour les robots grands et puissants, peut devenir un risque d'incendie.

1.8.2 Entraînement hydraulique

Les plus gros robots utilisent des entraînements hydrauliques. Système d'entraînement hydraulique peut fournir mouvement de rotation (actionneurs rotatifs à palettes) et mouvement linéaire (pistons hydrauliques). [7]

- **Avantages**

- Plus de ratio poids / force
- Peut aussi actionner à une vitesse supérieure

- **Désavantages**

- Nécessite plus d'espace au sol
- Tendance aux fuites d'huile

1.8.3 Entraînement pneumatique

Entraînement pneumatique peut être appliqué à l'actionnement de dispositifs à piston pour fournir des mouvements linéaires. Les mouvements de rotation peuvent être obtenus par des actionneurs rotatifs. [7]

1.8.4 Robots à entraînement direct

Il utilise des moteurs électriques situés au niveau des articulations du manipulateur.

- **Avantage**

- Élimine le jeu et les défauts mécaniques
- Élimine le besoin d'une transmission d'énergie.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un avis général sur le domaine de la robotique Surtout les robots industriels :

Définitions, historique des robots, classification des robots, éléments constitutifs d'un robot, ainsi que d'autres concepts connexes.

Les informations présentées vont nous servir de déterminer le champ de notre étude qui sera abordé dans les prochains chapitres.

Chapitre 2 : Modélisation du robot SCARA, Type RRP

2.1 Introduction

Pour contrôler le système d'un robot ou simuler son comportement on doit disposer des modèles mathématiques. Ces modèles sont établis selon les objectifs visés, les contraintes des tâches à réaliser et les performances recherchées. On distingue trois types de : modèle géométrique, modèle cinématique et modèle dynamique.

L'obtention de ces différents modèles est une tâche ardue. La difficulté varie selon la complexité de la chaine cinématique et le nombre de degrés de liberté du système. Ces modèles, qu'ils seront utilisés en simulation et en commande du robot, devront donner une image réelle au comportement géométrique, cinématique et dynamique du systeme dans l'espace opérationnel.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le formalisme mathématique de chaque type de modélisation, à savoir :

- 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 directes 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.

2.2 Description géométrique [7]

La description géométrique fait appel aux matrices de transformation homogène de dimension (4x4).

Une matrice homogène $^{i}\mathbf{T_j}$ représente la transformation permettant de passer du repère $\mathbf{R_i}$ au repère $\mathbf{R_j}$.

$$ {}^{i}T_j = T_{ij} = \left|\overrightarrow{{}^{i}s_j} \quad \overrightarrow{{}^{i}n_j} \quad \overrightarrow{{}^{i}a_j} \quad \overrightarrow{{}^{i}P_j}\right| = \begin{vmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} {}^{i}A_j & {}^{i}P_j \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad [7]\ (2.1) $$

Où $\overrightarrow{{}^{i}s_j}, \overrightarrow{{}^{i}n_j}, \overrightarrow{{}^{i}a_j},$ sont les vecteurs unitaires suivent les axes : x_j, y_j, z_j , du repère exprimé dans le repère $\mathbf{R_i}$.

Ils représentent les cosinus directeurs de la matrice d'orientation $^{i}\mathbf{A_j}$.

$\overrightarrow{{}^{i}P_j}$ **:** Est le vecteur exprimant l'origine du repère $\mathbf{R_j}$, avec $\overrightarrow{{}^{i}P_j} = \overrightarrow{O_i O_j}$ **;**

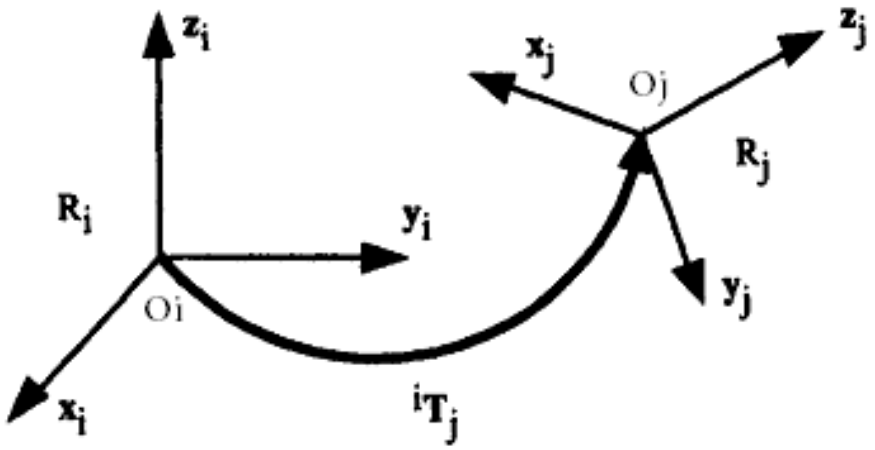


Figure 2.1 : Transformation des repères.[7]

2.2.1 Paramétrage géométrique

La modélisation des robots exige une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées. Dans le cas des architectures ouvertes simples de systèmes mécaniques articulés, la méthode de **Denavit-Hartenberg** est la plus répandue [8].

Une structure ouverte simple est composée de **n+1** corps notés **C0**, …, **Cn** et de **n** articulations. Le corps **C0** désigne la base du robot et le corps **Cn** le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation j connecte le corps **Cj** au corps **Cj-1** (voir la figure).

La méthode de description de **Denavit-Hartenberg** 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 **Rj** est lié au corps **Cj** ;
- L'axe **Zj** est porté par l'axe de l'articulation **j** ;
- L'axe **Xj** est porté par la perpendiculaire commune aux axes **Zj** et **Zj-1**.

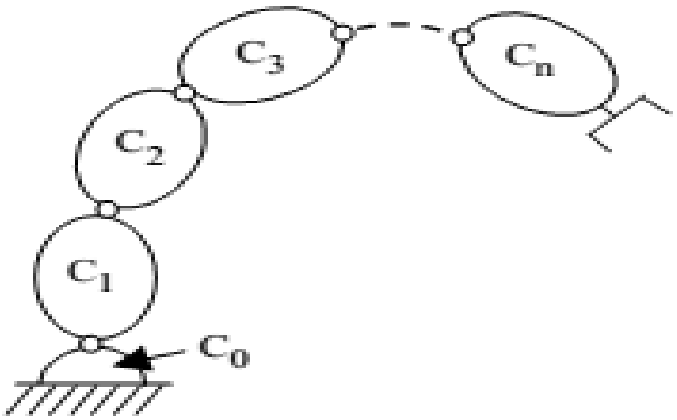


Figure 2.2: Robot à structure ouverte simple [8]

Le passage du repère $\mathbf{R_{j-1}}$ au repère **Rj** s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants (voir la **figure 2.3**.) :

- $\mathbf{a_i}$ **:**(Link length) est la distance entre $\mathbf{Z_{i-1}}$ et $\mathbf{Z_i}$ le long de l'axe $\mathbf{X_i}$, $\mathbf{a_i}$ est la longueur cinématique du lien **i** ;
- $\boldsymbol{\alpha_i}$:(Link twist) est la rotation de l'axe $\mathbf{Z_{i-1}}$ autour $\mathbf{X_i}$ pour devenir parallèle à l'axe $\mathbf{Z_i}$ **;**
- $\mathbf{d_i}$ **:** (Joint distance) est la distance entre $\mathbf{X_{i-1}}$ et $\mathbf{X_i}$ le long de l'axe $\mathbf{X_{i-1}}$;
- $\boldsymbol{\theta_j}$ **:** (Joint angle) angle entre les axes $\mathbf{X_{i-1}}$ et $\mathbf{X_i}$ correspondant à une rotation autour de $\mathbf{Z_i}$.

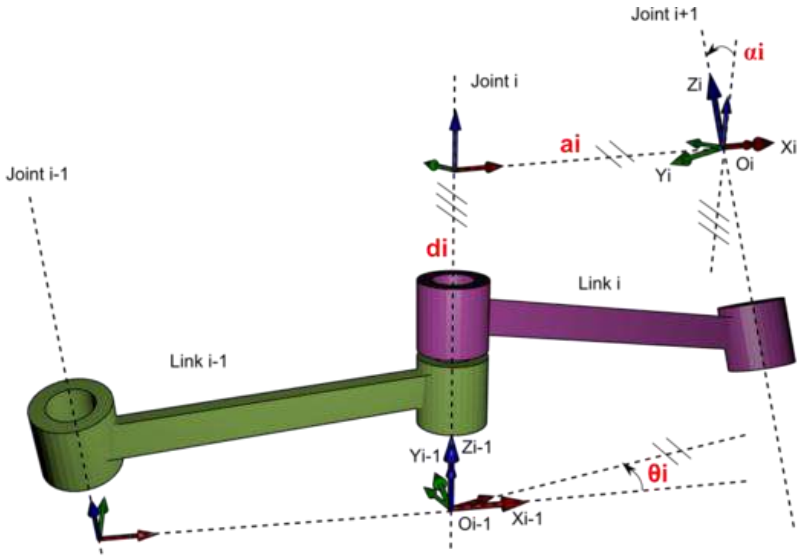


Figure 2.3: paramètre géométrique dans le cas d'une structure ouvert simple [7]

La matrice de transformation définissant le repère **Ri** dans le repère **Ri-1** est donnée par **:**

$$^{i}T_{j} = \mathrm{Trans}_{Z_{i-1}}(d_i).\mathrm{Rot}_{Z_{i-1}}(\theta_i).\mathrm{Trans}_{X_i}(a_i).\mathrm{Rot}_{X_i}(\alpha_i) \qquad (2.2)$$

Où **Rot** (**u**, α) et **Trans** (**u**, d) sont des matrices de transformation homogène (4x4) représentant respectivement une rotation α autour de l'axe **u** et une translation d le long de **u**.

$$^{i-1}T_{i}\begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i}C_{\alpha_i} & S_{\theta_i}S_{\alpha_i} & r_iC_i \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i}C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i}S_{\alpha_i} & r_iS_i \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

2.3 Modélisation géométrique

La modélisation géométrique permet d'exprimer la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.

On distingue deux types de modélisation :

- Modélisation géométrique direct ;
- Modélisation géométrique inverse.

2.3.1 Modélisation géométrique direct

Le modèle géométrique direct permet de déterminer la position et l'orientation de l'organe terminal du manipulateur par rapport à un repère de référence en fonction des variables articulaires, le modèle s'écrit [7] :

$$X = F(q) \tag{2.4}$$

Avec : $\mathbf{q}=(\mathbf{q_1}, \mathbf{q_2} \dots \dots \dots \mathbf{q_n})^{\mathbf{T}} \in \mathbf{R^n}$ **:** Vecteur des variables articulaires.

$\mathbf{X}=(\mathbf{x_1}, \mathbf{x_2} \dots \dots \dots \mathbf{x_n})^{\mathbf{T}} \in \mathbf{R^m}$ **:** Vecteur des variables opérationnelles $\mathbf{m \leq n}$.

Si le manipulateur se déplace dans l'espace on pose **m=6** (**3** coordonnées pour la position et **3** coordonnées pour la rotation).
S'il se déplace dans un plan on pose **m=2** et si en plus il est concerné par la rotation on pose **m=3.**

La position de l'organe terminal peut être définie par des cordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques. Le choix d'une structure particulière est guidé par les caractéristiques du robot, ainsi que par celle de la tâche à réaliser.

Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, le modèle géométrique direct peut être représenté par la matrice de transformation ${}^{0}T_{n}$:

$${}^{0}T_{n} = {}^{0}T_{1}(q_1)\,{}^{1}T_{2}(q_2) \dots \dots \dots \dots \dots \dots . \, {}^{N-1}T_{n}(q_n) \tag{2.5}$$

2.3.2 Modélisation géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse permet de déterminer le vecteur des variables articulaires à partir du vecteur de coordonnées opérationnelles, le modèle s'écrit : [7]

$$Q=F^{-1}(x) \tag{2.6}$$

Parmi les méthodes utilisées pour déterminer le modèle géométrique inverse on cite :

- **Les méthodes géométriques** : Elles permettent de déterminer le vecteur **q** par utilisation des transformations géométriques en prenant avantage de la structure particulière du manipulateur considéré.
- **Les méthodes algébriques** : Elles permettent de déterminer le vecteur en effectuant des transformations algébriques sur l'équation (2.5). Parmi les méthodes utilisées, on cite la méthode de Paul.

Soit $\mathbf{U_0}$la situation désirée pour l'organe terminal, telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

La méthode de **PAUL** consiste à résoudre un système d'équations obtenu par pré multiplier successivement les deux membres de l'équation (2.8) par les matrices homogènes inverse $^{\mathbf{i}}\mathbf{T_{i-1}}$; Avec (i=1…n-1).[7]

$$U_0 = {}^0T_n \tag{2.8}$$

Lors de la résolution du problème géométrique inverse on rencontre pratiquement les situations suivantes :

- Solutions en nombre fini, lorsqu'elles peuvent être calculées sans ambiguïté.

- Aucune solution possible lorsque la position désirée ne peut être atteinte par le manipulateur.

- Plusieurs solutions possibles lorsque le manipulateur est redondant ou lorsqu'il passe par une configuration singulière.

2.4 Modélisation cinématique

La modélisation cinématique permet d'exprimer la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement. [7]

2.4.1 Modélisation cinématique direct

Le modèle cinématique directe permet de déterminer la vitesse de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction de la vitesse des variables articulaires. [8]
Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \tag{2.9}$$

$\mathbf{J(q)} \in \boldsymbol{R^n}$: est la matrice jacobéenne.

L'une des méthodes utilisées pour le calcul de la matrice jacobéenne est la dérivation du modèle géométrique direct (2.4), à partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_i} \qquad \text{Avec : i=1, …, m ; j=1, …, n} \tag{2.10}$$

Avec : $\mathbf{J_{ij}}$ est l'élément (i, j) de la matrice jacobéenne $\mathbf{J(q)}$

2.4.2 Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse permet de déterminer la vitesse des variables articulaires en fonction de la vitesse des variables opérationnelles. [8]

Pour les manipulateurs non redondants (n=m), le modèle s'écrit :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \tag{2.11}$$

La solution de l'équation (2.11) existe si 'J' est de rang plein, cela est valable tant que le manipulateur ne passe pas par une configuration singulière.

Pour les manipulateurs redondants, le modèle cinématique inverse admet plusieurs solutions possibles. Le choix d'une solution parmi plusieurs est guidé par l'optimisation d'une fonction objective.

2.5 Modélisation dynamique

La modélisation dynamique définit 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. [7]

2.5.1 Modélisation dynamique inverse

Le modèle dynamique (appelé modèle dynamique inverse) exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations des articulations, les formalismes les plus utilisés pour les calculs du modèle dynamique inverse sont :

- Formalisme de Lagrange ;
- Formalisme de newton-Euler.

2.5.1.1 Formalisme de Lagrange

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement en termes de travail et d'énergie du robot.

La forme générale représentant le mouvement d'un robot manipulateur constitue de **n** degrés de liberté et de **n** articulations, s'écrit suivant Lagrange : [9]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = \tau \qquad \text{Avec : } i = 1, \ldots, n \tag{2.12}$$

$\boldsymbol{\tau}$: Fonction lagrangienne de robot égale à : **L = K - V.**

K : Energie cinétique totale du robot manipulateur.

V : Energie potentielle totale du robot manipulateur.

x : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{\mathbf{x}}$: Vecteur des vitesses articulaires.

Pour le calcul du modèle dynamique d'une chaîne cinématique, on définit les paramètres suivants pour chaque corps i de la chaîne cinématique : [7]

$\mathbf{m_i}$: Masse du corps i de la chaîne cinématique.

$\mathbf{{}^{i}r = [{}^{i}r_x\ , {}^{i}r_y\ , {}^{i}r_z]^T}$ Vecteur du centre d'inertie du corps i exprimé dans le repère $\mathbf{R_i}$

$\mathbf{m\,{}^{i}r = [m\,{}^{i}r_x\ , m\,{}^{i}r_y\ , m\,{}^{i}r_z]^T}$ Premier moment du corps i autour de $\mathbf{O_i}$ exprimé dans $\mathbf{R_i}$

$${}^{i}I_i = \begin{bmatrix} {}^{i}I_{ixx} & -{}^{i}I_{ixy} & -{}^{i}I_{ixz} \\ -{}^{i}I_{iyx} & {}^{i}I_{iyy} & -{}^{i}I_{iyz} \\ -{}^{i}I_{izx} & -{}^{i}I_{izy} & {}^{i}I_{izz} \end{bmatrix}$$: Tenseur d'inertie du corps i en $\mathbf{O_i}$, exprimé dans $\mathbf{R_i}$

Où :

${}^{i}I_{ixx} = ({}^{i}r_y^2 + {}^{i}r_z^2)dm_i$: Moment d'inertie.

${}^{i}I_{ixy} = \int {}^{i}r_x\,{}^{i}r_y\,dm_i$: Produit d'inertie.

${}^{i}S_i = [{}^{i}S_{ix}\ , {}^{i}S_{iy}\ , {}^{i}S_{iz}]^T$: Position du centre de masse du corps **i** exprimée en $\mathbf{R_i}$

$H_i = {}^{i}r\,{}^{i}r^T dm_i$: Matrice des pseudo-inerties du corps i.

$$H_i=\begin{bmatrix} \frac{-{}^{i}I_{ixx}+{}^{i}I_{iyy}+{}^{i}I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i S_{ix} \\ I_{ixy} & \frac{{}^{i}I_{ixx}-{}^{i}I_{iyy}+{}^{i}I_{izz}}{2} & I_{iyz} & m_i S_{iy} \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{{}^{i}I_{ixx}+{}^{i}I_{iyy}-{}^{i}I_{izz}}{2} & m_i S_{iz} \\ m_i S_{ix} & m_i S_{iy} & m_i S_{iz} & m_i \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

L'énergie cinétique du corps i est donnée par :

$$K_i = \frac{1}{2}\int {}^{0}\dot{r}^{T}\,{}^{0}\dot{r}\ di \quad [7]\ (2.14)$$

$$K_i = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i}\sum_{k=1}^{i} \mathrm{trace}\left(\frac{\partial {}^{0}T}{\partial q_i} H_i \frac{\partial {}^{0}T_i^{T}}{\partial q_i}\right)\dot{q}_j\dot{q}_k \quad (2.15)$$

trace : signifie trace de la matrice ; elle est égale à la somme des éléments de la diagonale.

L'énergie de potentiel du corps i est donnée par :

$$V_i = -m_i g^{T} T_i^{i} s_i \quad (2.16)$$

$g = [g_x, g_y, g_z, 0]^T$: Est le vecteur des accélérations de la gravité exprimé dans R_0

Le Lagrangien pour l'ensemble des corps du manipulateur est :

$$L = \sum_{k=1}^{n}(K_i - V_i) \quad (2.17)$$

$$\tau = \sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{k} \mathrm{trace}\left(\frac{\partial {}^{0}T_k}{\partial q_j} H_k \frac{\partial {}^{0}T_k^{T}}{\partial q_j}\right)\ddot{q}_j + \sum_{k=i}^{n}\sum_{j=1}^{k}\sum_{m=1}^{k} \mathrm{trace}\left(\frac{\partial^2 {}^{0}T_k}{\partial q_j\,\partial q_m} H_k \frac{\partial {}^{0}T_k^{T}}{\partial q_i}\right)\dot{q}_j\dot{q}_m - \sum_{j=1}^{n} m_j g^{T}\frac{\partial {}^{0}T_j^{j}}{\partial q_i} S_j \quad (2.18)$$

Le modèle obtenu peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (2.19)$$

$$M_{ij} = \sum_{k=\max(i,j)}^{n} \mathrm{trace}\left(\frac{\partial {}^{0}T_k}{\partial q_j} H_k \frac{\partial {}^{0}T_k^{T}}{\partial q_j}\right) \quad (2.20)$$

$$N(q,\dot{q}) = \sum_{k=i}^{n}\sum_{j=1}^{k}\sum_{m=1}^{k} \mathrm{trace}\left(\frac{\partial^2 {}^{0}T_k}{\partial q_j\,\partial q_m} H_k \frac{\partial {}^{0}T_k^{T}}{\partial q_i}\right)\dot{q}_j\dot{q}_m \quad (2.21)$$

$$G(q) = \sum_{j=1}^{n} m_j g^{T}\frac{\partial {}^{0}T_j^{j}}{\partial q_i} S_j \quad (2.22)$$

M_{ij} : Matrice d'inertie du manipulateur, symétrique et régulière.

$N(q,\dot{q})\,\dot{q}$: Vecteur des termes de Coriolis et centrifuges.

G(q) : Vecteur des actions de la gravité.

2.5.1.2 Formalisme de Newton-Euler [8]

Le formalisme de **Newton-Euler** est basé sur les théorèmes généraux de la mécanique.
Il exprime le torseur dynamique en Gi des efforts extérieurs sur un corps i par les équations suivantes :

$$F_i = M_i \dot{V}_{Gi} \quad (2.23)$$

$$M_{Gi} = I_{Gi}\dot{\omega}_i + \dot{\omega}_i \hat{} (I_{Gi}\dot{\omega}_i) \quad (2.24)$$

Cette méthode permet d'd'établir directement le modèle dynamique inverse (2.12) sans avoir à calculer explicitement les matrices **M**, **N** et **G** de l'équation (2.19).
Les paramètres inertiels utilisés sont M_j, $S_j$et M_{Gj} :

$\mathbf{M_j}$: moment des efforts extérieurs exercés sur le corps $\mathbf{C_j}$ autour de $\mathbf{O_j}$;
$\mathbf{S_j}$ Vecteur ayant pour origine $\mathbf{O_j}$et pour extrémité le centre de masse du corps $\mathbf{C_j}$. Il est égal à $\mathbf{O_jG_j}$
$\mathbf{I_{Gi}}$ Matrice d'inertie du corps $\mathbf{C_j}$ par rapport à un repère parallèle à $\mathbf{R_j}$ et d'origine $\mathbf{G_j}$**;**

Le modèle ainsi obtenu n'est pas linéaire par rapport aux paramètres inertiels.

2.5.2 Modélisation dynamique directe

Le modèle dynamique direct exprime la position, la vitesse et l'accélération des articulations en fonction du couple appliqué, il est obtenu par inversion du modèle précédent,
Il s'écrit comme suit :

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - N(q,q) - G(\dot{q}) - \tau_f) \quad (2.25)$$

2.6 Modélisation du robot SCARA type RRP

Dans notre étude, nous avons considéré un Robot SCARA de type RRP à trois degrés de liberté (deux liaisons rotoïdes et une liaison prismatique) (figure 3.4).

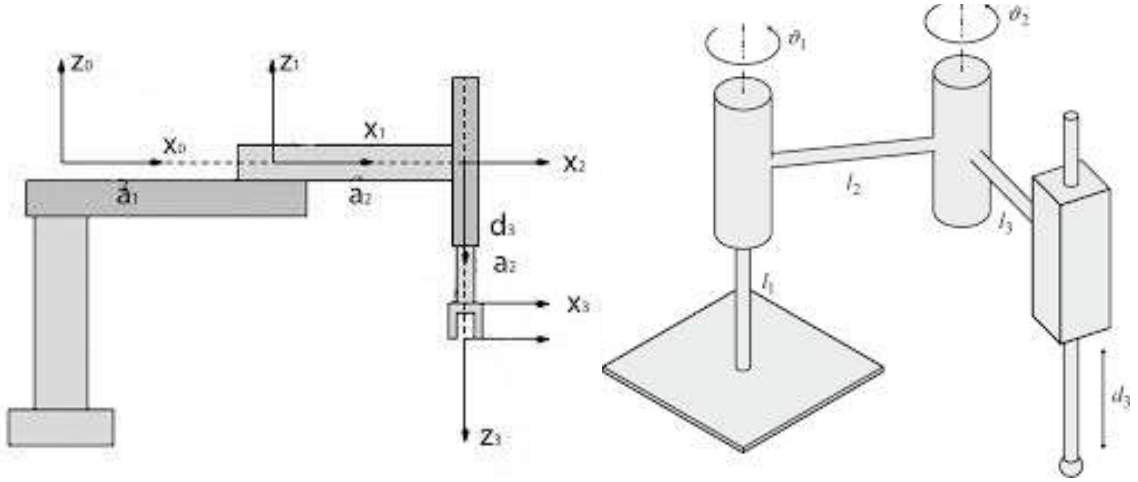


Figure 2.4 : Robot SCARA RRP. « Repérage »

Corps	$\mathbf{a_i = r_i}$	$\boldsymbol{\alpha_i}$	$\mathbf{d_i}$	$\boldsymbol{\theta_i}$
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	0	0	d_3	0

Tableau 2-1. Paramètres Denavit-Hanterberg(classique) du robot « paramétrage »

2.6.1 Relations géométriques

A partir du tableau 3.1 et l'utilisation de l'équation (2.3), on en déduit les relations géométriques suivantes :

$$ {}^{0}T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.26) $$

$$ {}^{1}T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27) $$

$$ {}^{2}T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28) $$

Sachant que :

- cos (θ_i)=C_i
- sin (θ_i)=S_i
- cos ($\theta_1 + \theta_2$)=C_{12}
- sin ($\theta_1 + \theta_2$)=S_{12}
- Cos(α)*cos(β)-sin(α)*sin(β)=cos (α+β)
- Sin(α)*cos(β)+cos(α)*sin(β)=sin (α+β)

2.6.2 Calcul du modèle géométrique direct

Le modèle géométrique directe est exprimé comme suit :

$$ {}^{0}T_3 = {}^{0}T_1 \, {}^{1}T_2 \, {}^{2}T_3 \quad (2.29) $$

Par multiplication successive des relations (2.26), (2.27) et (2.28), l'équation (2.30) devient :

$$ {}^{0}T_3 = {}^{0}T_1 * {}^{1}T_2 * {}^{2}T_3 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_2C_{12} + l_1C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_2S_{12} + l_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30) $$

2.6.3 Calcul du modèle géométrique inverse

Soit $\mathbf{U_0}$ la situation désirée pour l'organe terminal, telle que :

$$ U_0 = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31) $$

A partir de l'équation (2.29) et par identification des éléments de deux matrices, on obtient :

$$U_0 = {}^0T_3$$

$$\begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_2C_{12} + l_1C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_2S_{12} + l_1S_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Par identification

$$\begin{cases} P_x = l_2C_{12} + l_1C_1 & (2.33) \\ P_y = l_2S_{12} + l_1S_1 & (2.34) \\ P_z = -d_3 & (2.35) \\ \alpha = \theta_1 + \theta_2 & (2.36) \end{cases}$$

Calcul de l'angle θ_2 :

$$P^2{}_x = l_2^2C_{12}^2 + l_1^2C_1^2 + 2l_2l_1C_{12}C_1 \quad (2.37)$$

$$P^2{}_y = l_2^2S_{12}^2 + l_1^2S_1^2 + 2l_2l_1S_{12}C_1 \quad (2.38)$$

(2.37)+(2.38) $$P^2{}_x + P^2{}_y = l_2^2 + l_1^2 + 2l_2l_1[C_{12}^2C_1 + S_{12}S_1] \quad (2.39)$$

$$C_{12}^2C_1 + S_{12}S_1 = \frac{P^2{}_x + P^2{}_y - l_2^2 - l_1^2}{2l_2l_1} \quad (2.40)$$

$$C_2 = \frac{P^2{}_x + P^2{}_y - l_2^2 - l_1^2}{2l_2l_1} \quad (2.41)$$

$$\theta_2 = \text{accos}\left(\frac{P^2{}_x + P^2{}_y - l_2^2 - l_1^2}{2l_2l_1}\right) \quad (2.42)$$

Calcul de l'angle θ_1 :

On a

$$P_x = l_2C_{12} + l_1C_1 \quad (2.33)$$

$$P_y = l_2S_{12} + l_1S_1 \quad (2.33)$$

$$P_x = l_2(C_1C_2 - S_1S_2) + l_1C_1 \quad (2.43)$$

$$P_y = l_2(S_1C_2 + C_1S_2) + l_1S_1 \quad (2.44)$$

$$P_x = (l_1 + l_2C_2)C_1 - (l_2S_2)S_2 \quad (2.45)$$

$$P_y = (l_1 + l_2C_2)S_1 + (l_2S_2)C_2 \quad (2.46)$$

On pose:

$$B_1 = (l_1 + l_2C_2) \quad (2.47)$$

$$B_2 = (l_2S_2) \quad (2.48)$$

$$P_x = B_1C_1 - B_2S_2 \quad (2.49)$$

$$P_y = B_1S_1 + B_2C_2 \quad (2.50)$$

On résoudre le système d'équation : (2.49),(2.50) :

$$S_1 = \frac{B_1P_y - B_2P_x}{B_1^2 + B_2^2} \quad (2.51)$$

$$C_1 = \frac{B_2P_y + B_1P_x}{B_1^2 + B_2^2} \quad (2.51)$$

$$\theta_1 = \mathrm{ATAN2}(\sin\theta_1, \cos\theta_1) \quad (2.52)$$

2.6.4 Calcul du modèle cinématique directe

Le modèle cinématique directe est donnée par l'équation (2.9), à savoir :

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

Avec $J(q) \in \mathbf{R}^{n*m}$: est la matrice jacobéenne.

A partir des expressions (2.33), (2.34), (2.35), et (2.36), on note

$$f_1=P_x = l_2C_{12} + l_1C_1 \tag{2.53}$$

$$f_2 = P_y = l_2S_{12} + l_1S_1 \tag{2.54}$$

$$f_3 = P_z = -d_3 \tag{2.55}$$

La matrice jacobéenne est :

$$J(q)=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial d_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial d_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial d_3} \end{bmatrix} \tag{2.56}$$

On dérive les équations (2.53), (2.54), (2.55) :

$$J\ (q)=\begin{bmatrix} -l_2S_{12} - l_1S_1 & -l_2S_{12} & 0 \\ l_2C_{12} + l_1C_1 & l_2C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.57}$$

Donc, le modèle cinématique directe est exprimée comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -l_2S_{12} - l_1S_1 & -l_2S_{12} & 0 \\ l_2C_{12} + l_1C_1 & l_2C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

Remarque : on calcule le modèle cinématique pour déterminer les vitesses

2.6.5 Calcul du modèle Cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse est donnée par l'équation (2.11), à savoir :

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

$$J^{-1}(q) = \begin{bmatrix} \frac{C_{12}}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & \frac{S_{12}}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & 0 \\ \frac{-(l_2C_{12}+l_1C_1)}{C_{12}S_1l_2^2+l_1S_{12}C_1l_2} & \frac{-(S_{12}-S_1)}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.59}$$

$$\dot{q}= \begin{bmatrix} \frac{C_{12}}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & \frac{S_{12}}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & 0 \\ \frac{-(l_2C_{12}+l_1C_1)}{C_{12}S_1l_2^2+l_1S_{12}C_1l_2} & \frac{-(S_{12}-S_1)}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \end{bmatrix}$$

$$\dot{\theta}_1=\frac{C_{12}+S_{12}}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1}\dot{P}_x \tag{2.60}$$

$$\dot{\theta}_2=\frac{-(l_2C_{12}+l_1C_1)}{C_{12}S_1l_2^2+l_1S_{12}C_1l_2}\dot{P}_x-\frac{(S_{12}-S_1)}{l_1S_{12}C_1+l_2C_{12}s_1}\dot{P}_y \tag{2.61}$$

$$\dot{d}_3=-\dot{P}_z \tag{2.62}$$

2.6.6 Calcul du modèle dynamique selon le formalisme de Lagrange

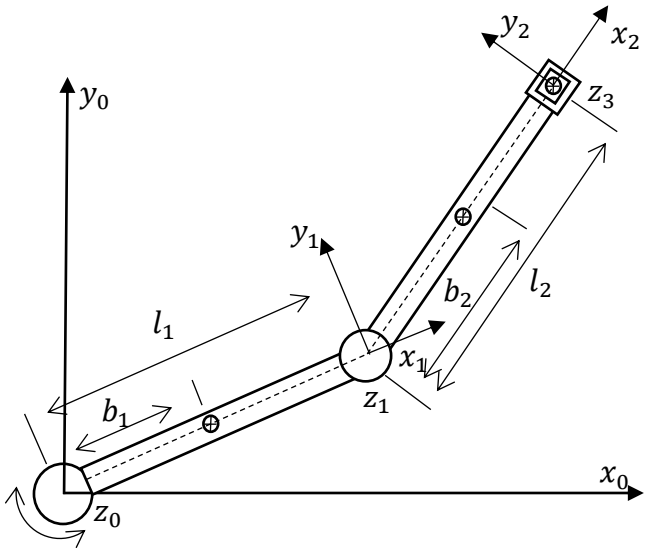


Figure 2.5: Répartition des masses

A partir de la **figure 3.5**, on déduit que :

$$\begin{cases} x_1 = b_1\cos\theta_1 \\ y_1 = b_1\sin\theta_1 \end{cases} \tag{2.63}$$

$$\begin{cases} x_{23} = l_1\cos\theta_1 + b_2\cos\emptyset \\ y_{23} = l_1\sin\theta_1 + b_2\sin\emptyset \end{cases} \tag{2.64}$$

Avec :

$$\begin{cases} b_1 = \frac{l_1}{2} \\ b_2 = \frac{l_2+r_3}{2} \\ \emptyset = \theta_1 + \theta_2 \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -b_1\dot{\theta}_1 \sin\theta_1 \\ \dot{y}_1 = b_1\dot{\theta}_1 \cos\theta_1 \end{cases} \quad (2.65)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{23} = -l_1\dot{\theta}_1 \sin\theta_1 - b_2\dot{\emptyset}\sin\emptyset \\ \dot{y}_{23} = l_1\dot{\theta}_1 \cos\theta_1 + b_2\dot{\emptyset}\cos\emptyset \end{cases} \quad (2.66)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1^2 = b_1^2\dot{\theta_1^2}\sin^2\theta_1 \\ \dot{y}_1^2 = b_1^2\dot{\theta_1^2}\cos^2\theta_1 \end{cases} \quad (2.67)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta_1^2}\sin^2\theta_1 + b_2^2\dot{\emptyset^2}\sin^2\emptyset + 2(l_1\dot{\theta}_1\sin\theta_1)(b_2\dot{\emptyset}\sin\emptyset) \\ \dot{y}_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta_1^2}\cos^2\theta_1 + b_2^2\dot{\emptyset^2}\cos^2\emptyset + 2(l_1\dot{\theta}_1\cos\theta_1)(b_2\dot{\emptyset}\cos\emptyset) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta_1^2}\sin^2\theta_1 + b_2^2\dot{\emptyset^2}\sin^2\emptyset + 2l_1b_2\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\sin\theta_1\sin\emptyset \\ \dot{y}_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta_1^2}\cos^2\theta_1 + b_2^2\dot{\emptyset^2}\cos^2\emptyset + 2l_1b_2\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}\cos\theta_1\cos\emptyset \end{cases} \quad (2.68)$$

2.6.7 Calcul de l'énergie cinétique Ec :

On a :

$$E_c = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}mV^2$$

$$E_c = \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\emptyset}^2 + \frac{1}{2}m_1V_1^2 + \frac{1}{2}(m_2+m_3)V_{23}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_2^2 + I_{23}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_1V_1^2 + \frac{1}{2}(m_2+m_3)V_{23}^2 \quad (2.69)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \\ V_{23}^2 = \dot{x}_{23}^2 + \dot{y}_{23}^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_1^2 = b_1^2 + \dot{\theta}_1^2 \\ V_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 + b_2^2\dot{\emptyset}^2 + 2l_1b_2\dot{\theta}_1\dot{\emptyset}(\cos\theta_1\cos\emptyset + \sin\theta_1\sin\emptyset) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_1^2 = b_1^2 + \dot{\theta}_1^2 \\ V_{23}^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 + b_2^2(\theta_1+\theta_2)^2 + 2l_1b_2\dot{\theta}_1(\theta_1+\theta_2)\cos\theta_2 \end{cases} \quad (2.70)$$

$$E_c = \frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_2^2 + I_{23}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_1\left(b_1^2 + \dot{\theta}_1^2\right) + \frac{1}{2}(m_2+m_3)[l_1^2\dot{\theta}_1^2 + b_2^2(\theta_1+\theta_2)^2 + 2l_1b_2\dot{\theta}_1(\theta_1+\theta_2)\cos\theta_2] \quad (2.71)$$

2.6.8 Calcul de l'énergie potentielle Ep

On a : Ep=mgh

$$Ep=m_1gh_1 + (m_2+m_3)gh_{23} \quad (2.72)$$

$$\begin{cases} h_1 = y_1 = b_1\sin\theta_1 \\ h_2 = y_{23} = l_1\sin\theta_1 + b_2\sin\emptyset \end{cases}$$

$$Ep=m_1g(b_1\sin\theta_1) + g(m_2+m_3)[l_1\sin\theta_1 + b_2\sin(\theta_1+\theta_2)] \quad (2.72)$$

2.6.9 Calcul de Lagrangien :

On a : L= Ec – Ep « (2.71)-(2.72) »

$$L=\frac{1}{2}I_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}I_{23}\dot{\theta}_2^2 + I_{23}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_1\left(b_1^2 + \dot{\theta}_1^2\right) + \frac{1}{2}(m_2+m_3)\left[l_1^2\dot{\theta}_1^2 + b_2^2(\theta_1+\theta_2)^2 + 2l_1b_2\dot{\theta}_1(\theta_1+\theta_2)\cos\theta_2\right] - [m_1g(b_1\sin\theta_1) + g(m_2+m_3)[l_1\sin\theta_1 + b_2\sin(\theta_1+\theta_2)]] \quad (2.73)$$

On applique maintenant l'équation **d'Euler-Lagrange** pour déterminer le modèle dynamique correspondant au robot étudier, soit :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial\theta}\right) = \tau_i \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial L}{\partial\theta_1} = -b_1gm_1\cos\theta_1 - b_2gl_1(m_2+m_3)\cos(\theta_1+\theta_2)$$

$$\frac{dL}{d\dot{\theta}_1} = (m_1+m_2)\left(b_2^2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right) + l_1\dot{\theta}_1 + \left[b_2l_1\cos\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_2\right)\right) - \theta_2\sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_2\right)\right)b_2l_1\dot{\theta}_1\right] + I_1\dot{\theta}_1 + b_2^2m_1\dot{\theta}_1 + I_{23}\dot{\theta}_2$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_1}\right) = (m_1 + m_2)\left(b_2^2\ddot{\theta}_1\right) + l_2^2\ddot{\theta}_1 - b_2 l_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) - \theta_2^2 \cos\left(\theta_2\left(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) - b_1 l_2\ddot{\theta}_1 + I_1\ddot{\theta}_1 + b_2^2 m_1\ddot{\theta}_1$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -b_2 g l_1 (m_1 + m_2)\cos(\theta_1 + \theta_2) - b_2 l_1\,\dot{\theta}_1\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\sin\left(\theta_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\right)$$

$$\frac{dL}{d\dot{\theta}_2} = (m_1 + m_2)\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right) - b_2 l_1\dot{\theta}_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) + I_{23}\dot{\theta}_2 + I_1\dot{\theta}_1$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_2}\right) = (m_1 + m_2)\ddot{\theta}_2 - b_2 l_1\dot{\theta}_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2\right)\right) + I_{23}\ddot{\theta}_2$$

A partir de l'équation (2.74) nous avons :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_1}\right) - \frac{dL}{d\dot{\theta}_{21}} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_2}\right) - \frac{dL}{d\dot{\theta}_2} = \tau_2 \end{cases} \tag{2.75}$$

$$\begin{aligned}\tau_1 = {} & (m_1 + m_2)\left(b_2^2\ddot{\theta}_1\right) + l_2^2\ddot{\theta}_1 - b_2 l_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) - \theta_2^2 \cos\left(\theta_2\left(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) - b_1 l_2\ddot{\theta}_1 \\ & + I_1\ddot{\theta}_1 + b_2^2 m_1\ddot{\theta}_1 - [(m_1 + m_2)\left(b_2^2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right) + l_1\dot{\theta}_1 \\ & + \left[b_2 l_1 \cos\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) - \theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) b_2 l_1\dot{\theta}_1\right] + I_1\dot{\theta}_1 + b_2^2 m_1\dot{\theta}_1 \\ & + I_{23}\dot{\theta}_2]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_2 = {} & (m_1 + m_2)\ddot{\theta}_2 - b_2 l_1\dot{\theta}_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2\right)\right) + I_{23}\ddot{\theta}_2 - [(m_1 + m_2)\ddot{\theta}_2 \\ & - b_2 l_1\dot{\theta}_1\theta_2 \sin\left(\theta_2\left(\dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2\right)\right) + I_{23}\ddot{\theta}_2]\end{aligned}$$

Le développement de l'équation (2.75) donne :

$$\begin{bmatrix}\tau_1 \\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}G_1 \\ G_2\end{bmatrix} \tag{2.76}$$

$$M_{11} = (m_1 + m_2)b_2^2 + b_2 m_1 - \theta_2^2 \cos\left(\theta_2\left(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)\right) b_2 l_1$$

$$M_{12} = M_{21} = 0$$

$$M_{22} = (m_1 + m_2) + I_{23}$$

$$H_{11} = H_{12} = 0$$

$$H_{21} = b_2 l_1 \theta_2 \cos\left(\theta_2(\dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)\right) - b_2 l_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin\left(\theta_2(\dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)\right)$$

$$H_{22} = b_2 l_1 \sin\left(\theta_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\right)$$

$$G_1 = -b_2 l_1 \theta_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\sin\left(\theta_2(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\right) - \theta_2^2 \cos\left(\theta_2(\ddot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\right) + b_2 + b_1 m_1 g \cos\theta_1 + g l_1 (m_2 + m_3)\cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$G_2 = b_2 g l_1 (m_2 + m_3)\cos(\theta_1 + \theta_2)$$

2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles utilisés pour décrire les mouvements des articulations d'une structure ouverte simple, ensuite, nous avons établis les différents modèles mathématiques permettant la programmation et le contrôle du robot.

Chapitre 3 : Conception et simulation du robot SCARA, RRP

3.1 Introduction

Après la modélisation du prototype du robot, nous devons assurer que le fonctionnement du robot est correct. En plus, la conception doit être compatible avec l'environnement de travail. Pour cela on va utiliser des outils (des logiciels informatiques) pour la simulation des systèmes mécanique et électrique du robot.

3.2 Conception de la maquette avec Solidworks

3.2.1 SOLIDWORKS :

Solidworks est le logiciel le plus utilisé dans le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO). Il a la capacité de présenter une structure mécanique articulé en 3D segment par segment et les rassembler un par un à l'aide des contraintes que ce soit coaxiale ou coïncidente ou autres. A la fin, nous obtenons une structure articulée, dans notre cas un robot. Pour modéliser la dynamique du robot et la simuler, l'assemblage réalisé sur la plateforme Solidworks est exporté vers Matlab dans l'environnement Simlink, dans laquelle, tous les modèles à savoir géométrique, cinématique et dynamique sont implémentés.

La démarche de conception de la maquette du robot consiste à suivre les étapes suivantes :

1. Choix des dimensions pour les éléments constitutifs du système mécanique ;
2. Conception des éléments ;
3. Assemblage des éléments ;
4. Associer à chaque élément un repère cartésien.

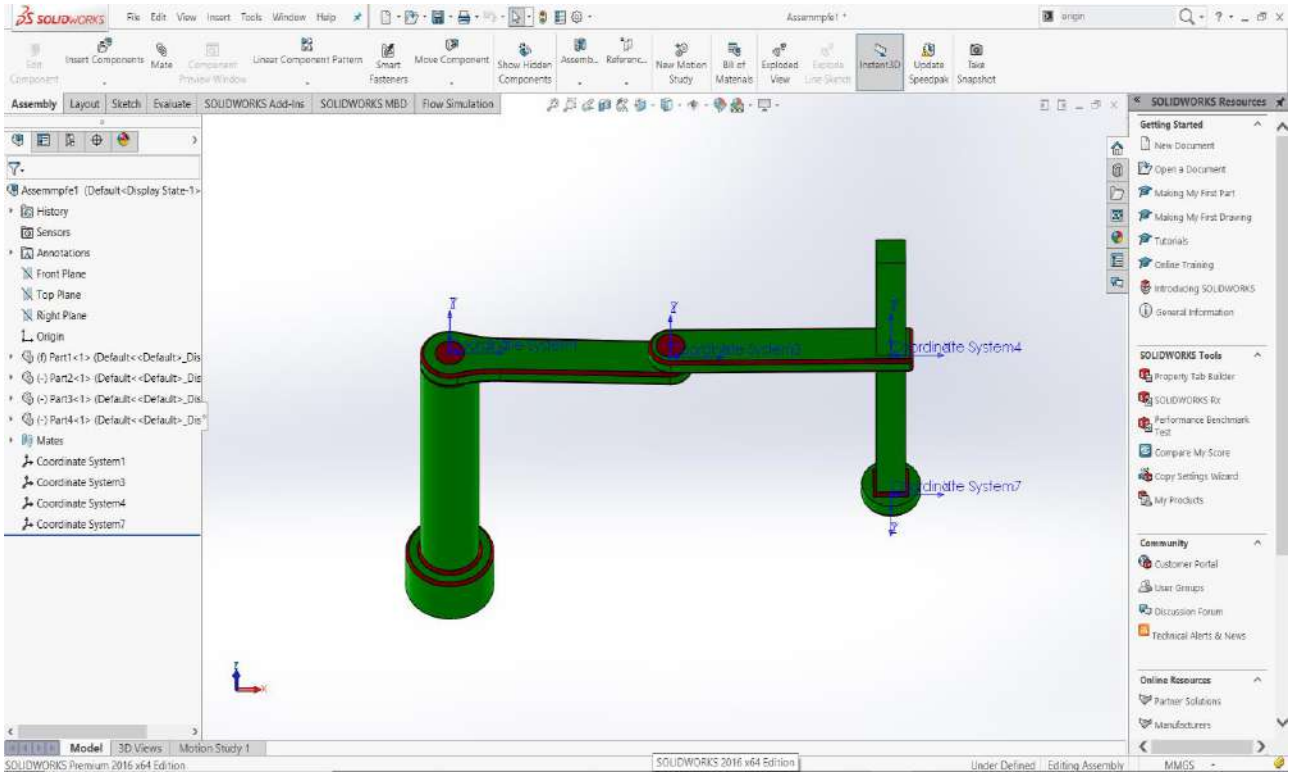


Figure 3.1 : Maquette du robot scara RRP

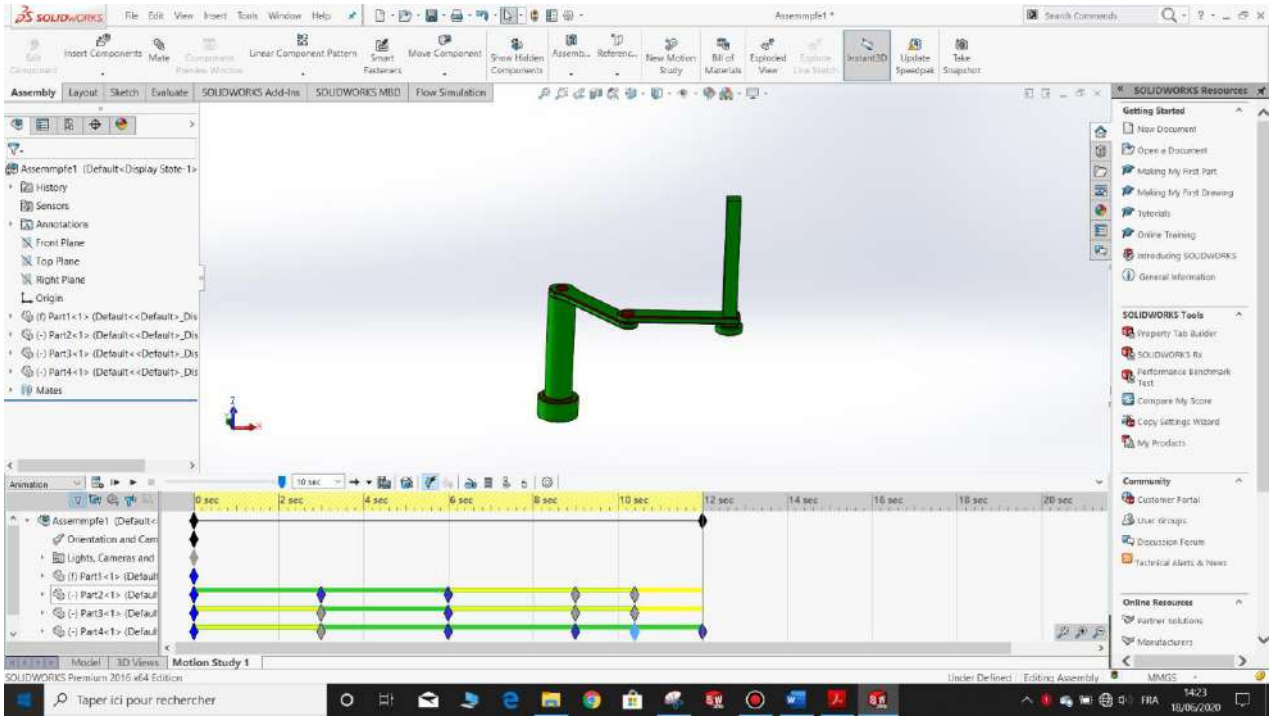


Figure 3.2 : vérification le mouvement du robot avec solidworks Animation

3.3 Simulation du mouvement avec simmechanic de MATLAB

3.3.1 SIMMECHANICS (simscape multibody) de simulink MATLAB

L'outil choisi pour simuler le ROBOT SCARA à 3ddl est Simmecahnics, qui est un sous-outil de Simulink®. Par conséquent, ses modèles peuvent être interfacés avec des schémas fonctionnels ordinaires de Simulink qui accélèrent la simulation et tout intégrer dans le même environnement.

De plus, il est simple à utiliser et son ensemble de blocs se compose de sept sous-bibliothèques qui représentent le corps, articulations, capteurs (capteurs articulaires, capteurs corporels), actionneurs (actionneurs articulaires, actionneurs), boîtes de vitesses, contraintes et entraîneurs, et éléments de force.

L'outil **Simmecahnics** permet de

- Modéliser tous les éléments d'un système multi-corps (corps, articulations, connexions, forces) dans Simulink.
- Importer des modèles complets à partir de systèmes de CAO (c'est-à-dire Stäubli SolidWorks CAD), avec la propriété d'inertie, longueurs, angles.
- Générez une animation 3D pour visualiser la dynamique du système.

3.3.1.1 La bibliothèque de Simmecahnics

Dans la bibliothèque de Simmecahnics on trouve 7 familles de fonctions que nous utilisons pour modéliser n'importe quelle structure mécanique articulée (dans notre cas c'est un robot)

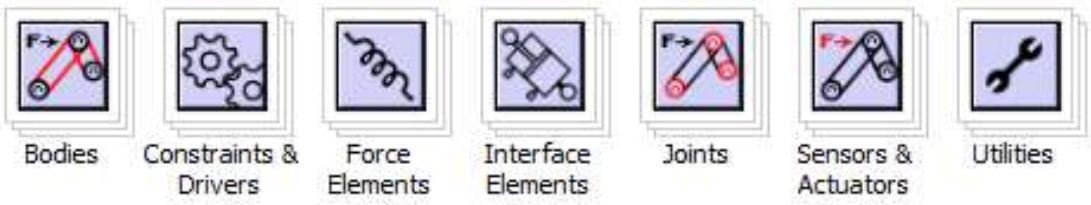


Figure 3.3: Les fonctions de simmecahnics

a. Corps (body)

Cette bibliothèque nous aidons à représenter les corps d'un robot on définit les propriétés suivantes : la masse, la matrice d'inertie, les coordonnées du centre de gravit

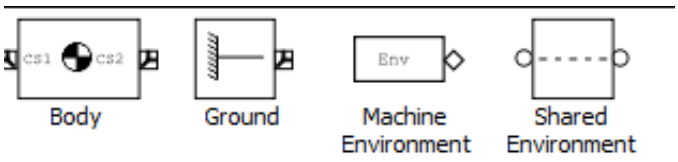


Figure 3.4: sous bibliothèque corps

b. Les articulation (joints)

Les blocs de données de cette bibliothèque servent à donner des degrés de liberté aux articulations. Les articulations du SCARA sont toutes rotorique, le bloc correspondant c'est « REVOLTE JOINT »

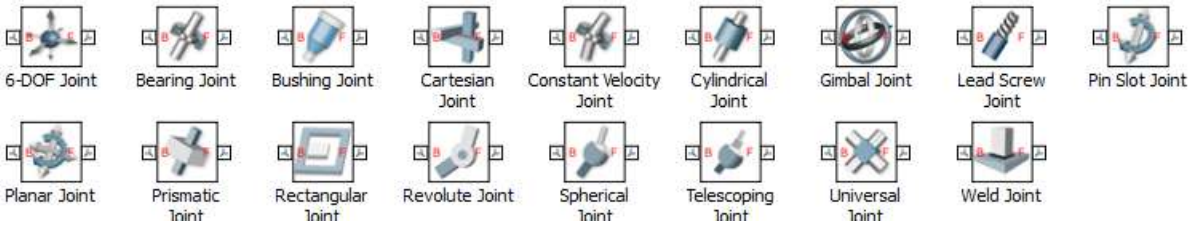


Figure 3.5 : sous bibliothèque articulations

L'objectif de la simulation est de vérifier l'exactitude des résultats de la modélisation des mouvements et de vérifier aussi le bon fonctionnement du robot. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel MATLAB_SIMULINK.

La démarche de simulation des mouvements consiste à suivre les étapes suivantes (voir la figure2.8) :

1. Lancer le logiciel SolidWorks ;

2. Ouvrir le fichier de la maquette ;

3. on choisit - outils (Tools) / Simscape multibody link / Export / Simscape multibody

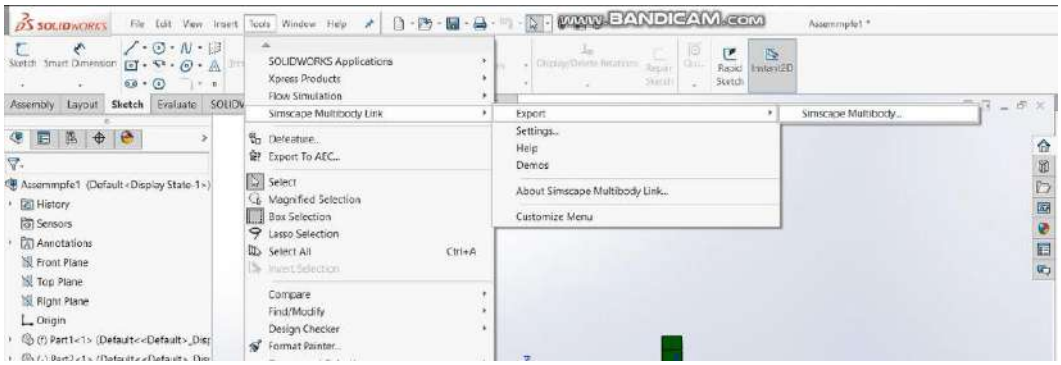


Figure 3.6 : Export le robot vers Simulink

4. Vérifier la création d'un fichier : *.xml ;

5. Dans la fenêtre de commande de MATLAB, saisir la fonction

« smimport ('le nom de l'assemblage.xml') » ;

6. Ouvrir le fichier *.xml par SIMULINK ;

7. Choisir les paramètres des articulations ;

8. Ouvrir la bibliothèque de SIMULINK, puis ajouter les éléments suivants :

From workspace / converter s-sp / converter sp-s / scope / sum

9. lancer le programme de commande dans MATLAB ;

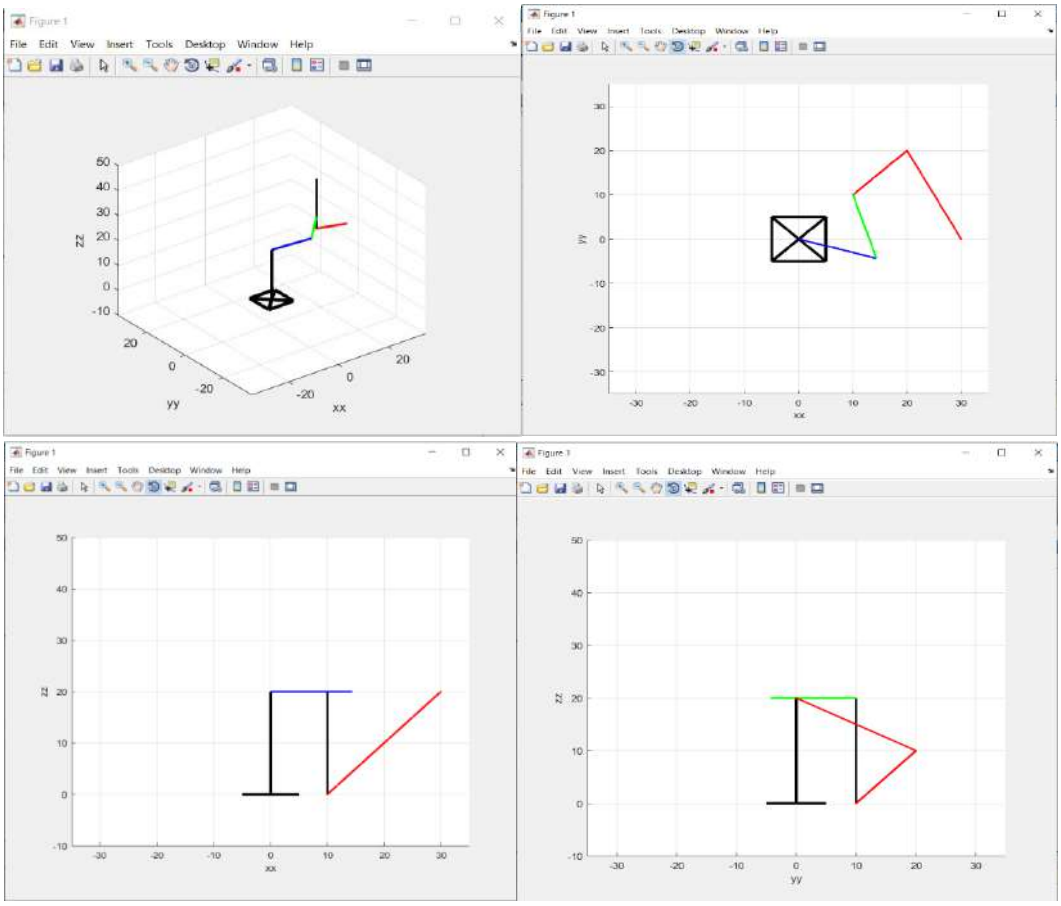


Figure 3.7 : résultat du code M (programme pour commande) pour simulation le robot scara

10. Cliquer sur le bouton Exécuter du SIMULINK.

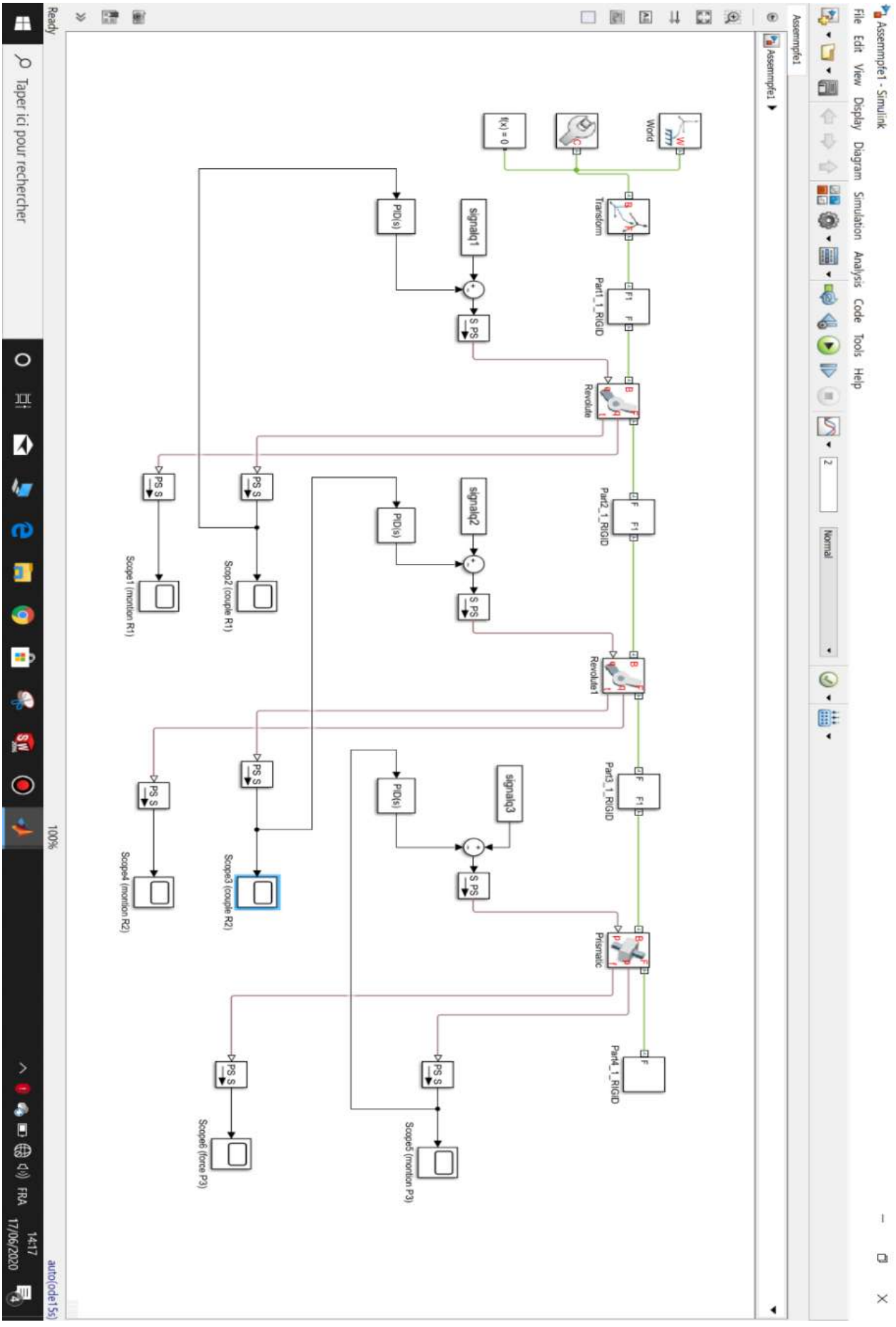


Figure 3.8 : schéma block du Simulation du mouvement du robot

Après l'exécution le schéma de la simulation, nous obtenons une animation (vidéo) du robot et les résultats des montions et couple des articulations du robot :

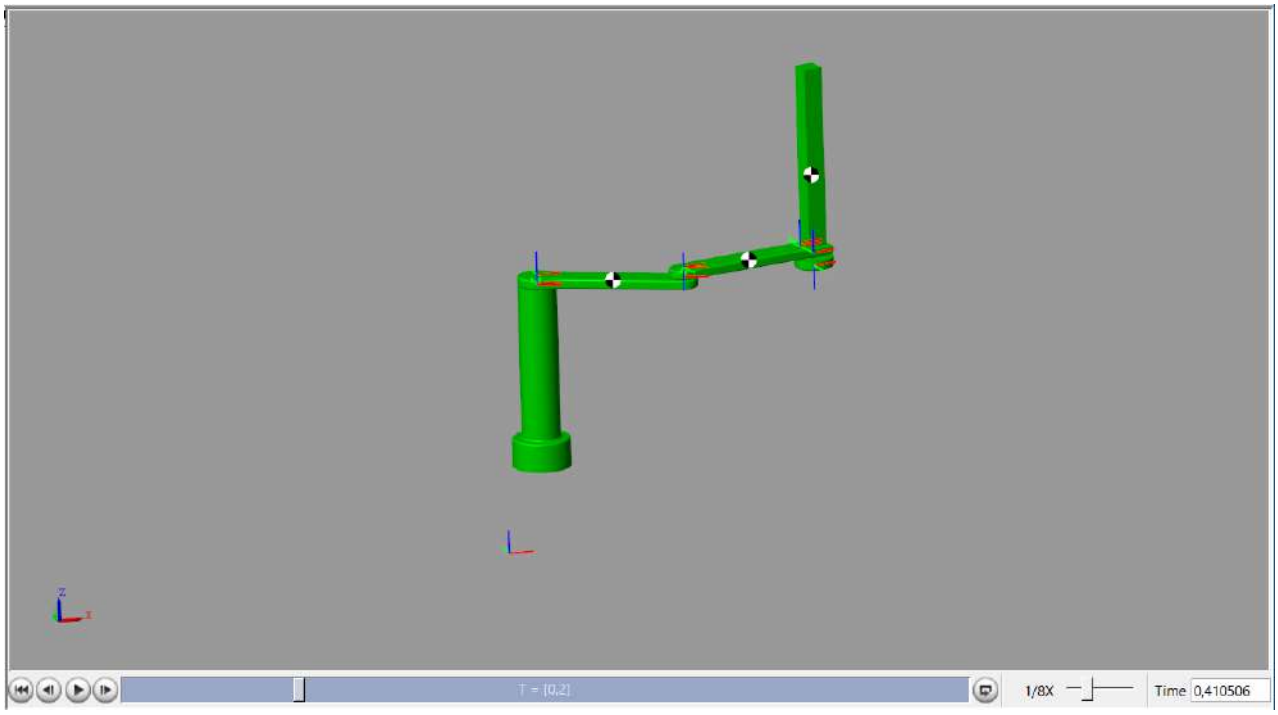


Figure 3.9 : simulation du robot Controller avec programme 'code M' (from woeorkspace

- **Les résultats obtenu (motion/ couple / force)**

- **Pour première articulation**

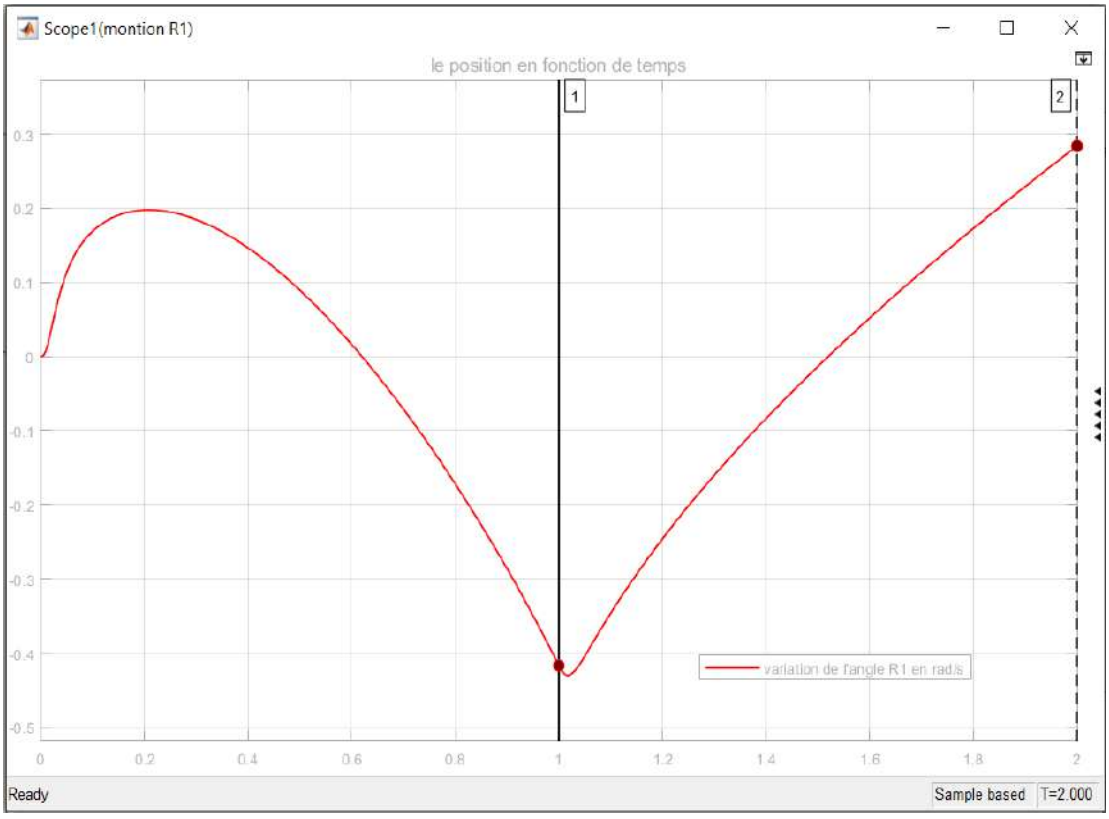


Figure 3.10 : variation de l'ange du première articulation R1en fonction le temps

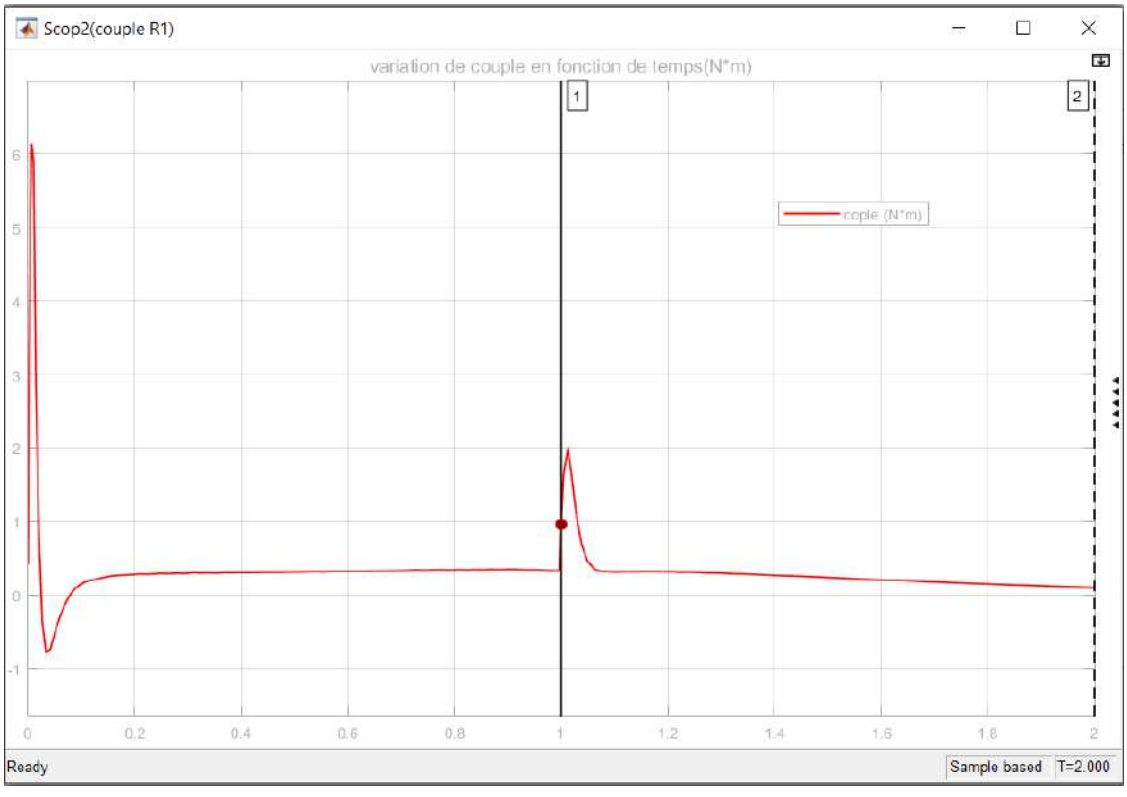


Figure 3.11: variation de couple de la première articulation R1

- **Pour deuxième articulation R2**

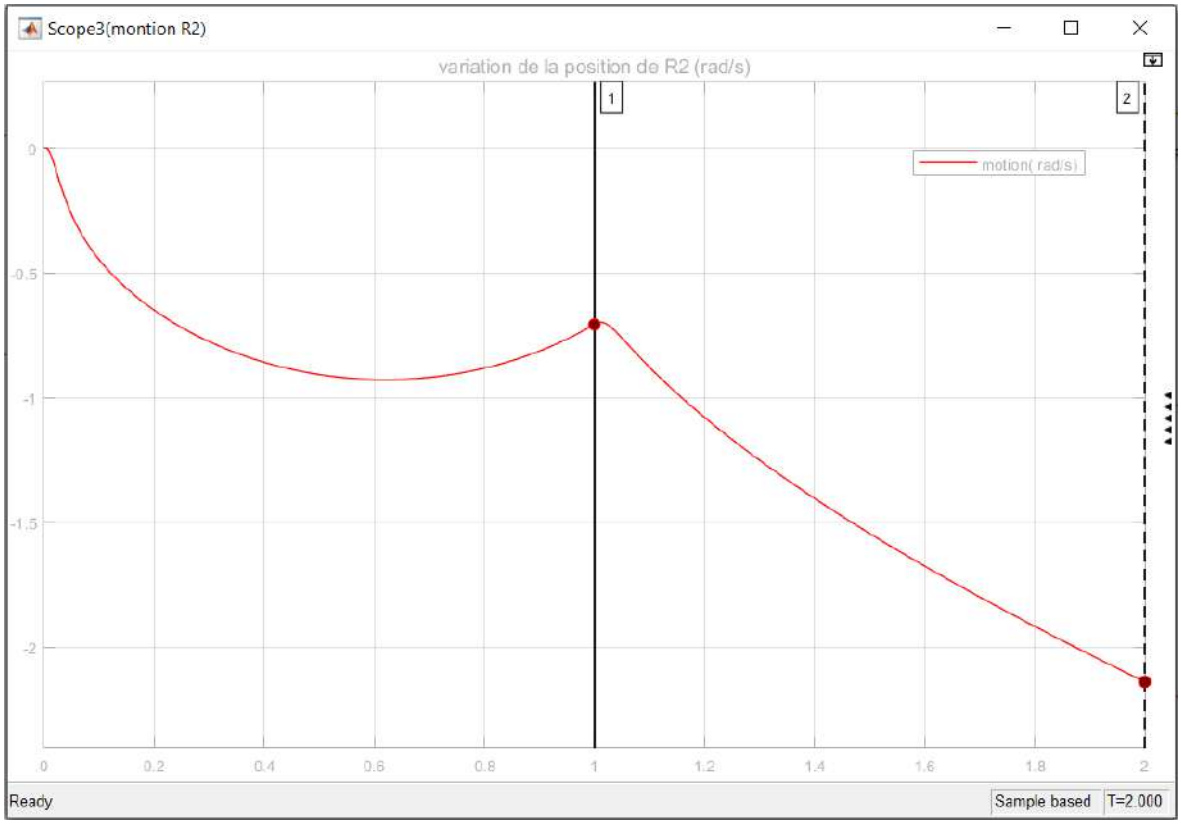


Figure 3.12 : variation de l'ange du deuxième articulation R2

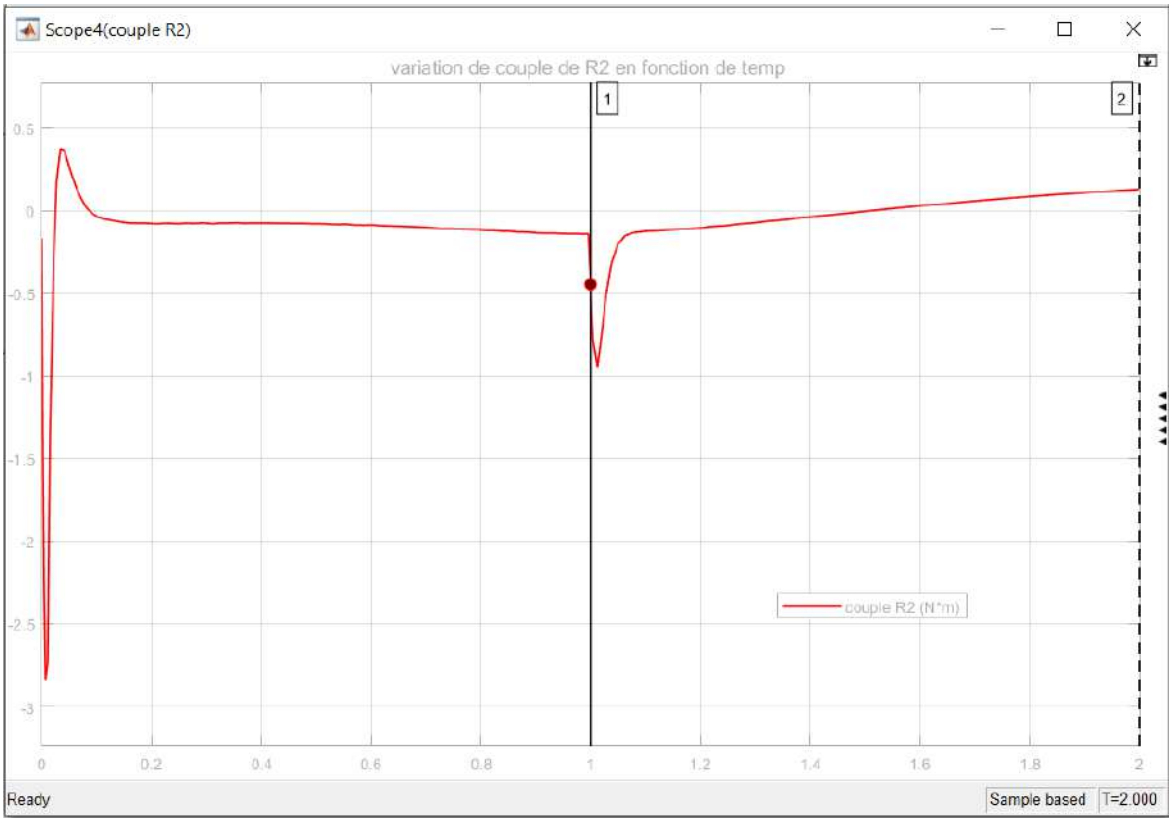


Figure 3.13: variation de couple de la deuxième articulation R2

- **Pour troisième articulation P3**

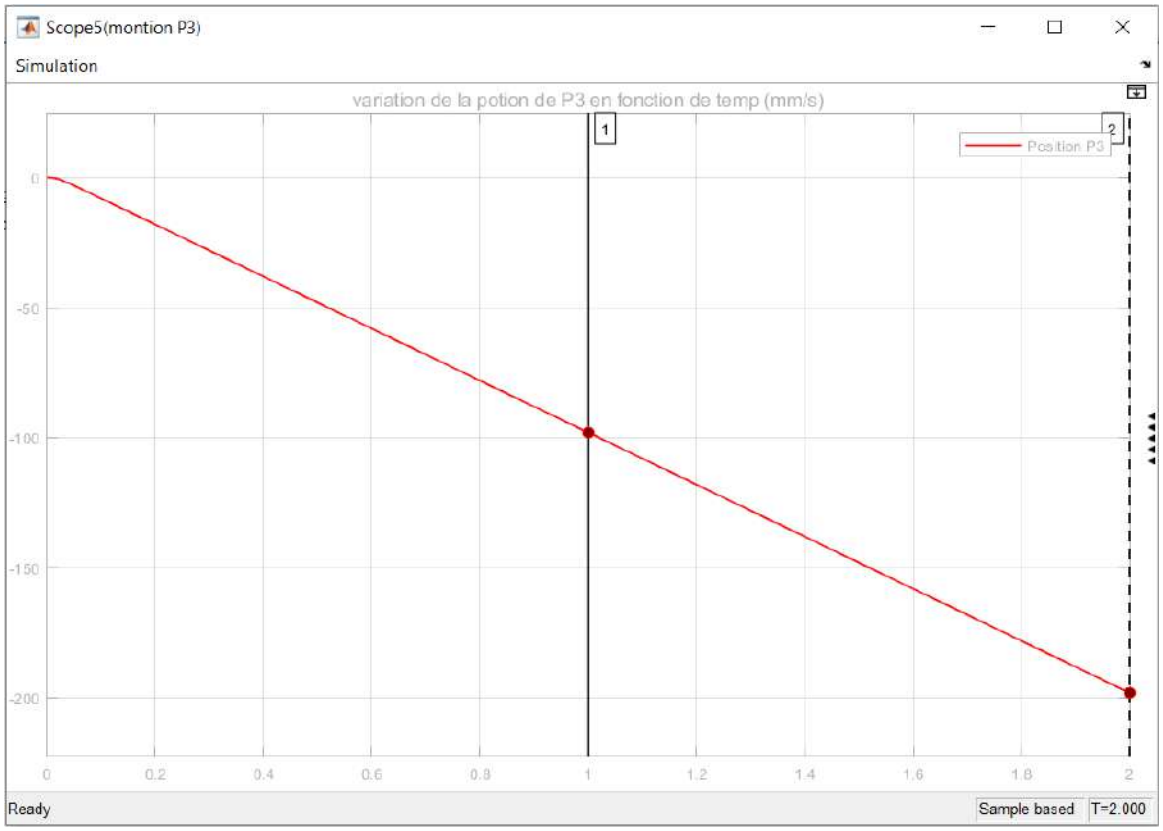


Figure 3.14 : variation de position du troisième articulation P3

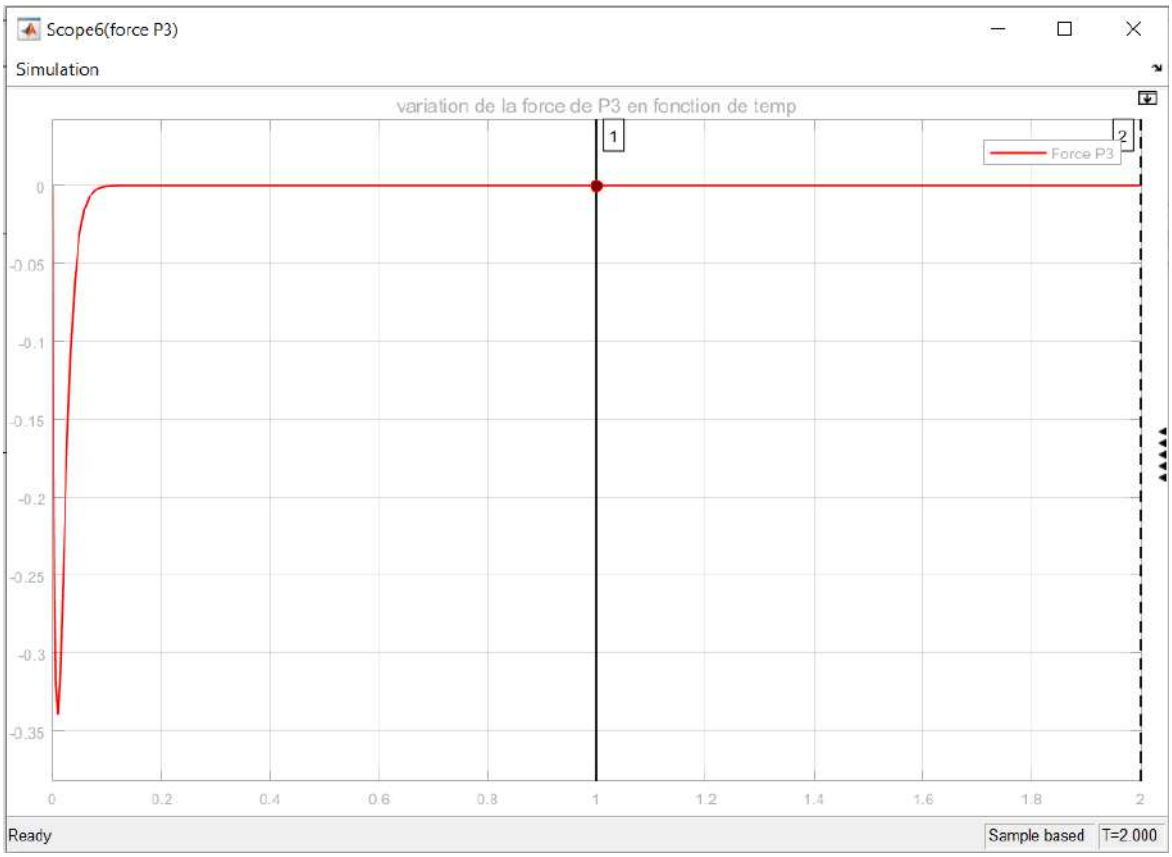


Figure 3.15 : variation de la force du troisième articulation P3

3.4 Simulation circuit électrique du système de commande des moteurs

3.4.1 Logiciel protes 8

La CAO électronique **Proteus** est une suite logicielle, éditée par la société Labcenter Electronics et revendue en France exclusivement par Multipower. Proteus est actuellement (2020) la seule CAO électronique qui permet la conception d'un système électronique complet et de le simuler, y compris avec le code des microcontrôleurs. Pour ce faire, elle inclut un éditeur de schéma (ISIS), un outil de placement-routage (ARES), un simulateur analogique-numérique, un environnement de développement intégré pour microcontrôleurs, un module de programmation par algorigrammes ainsi qu'un éditeur d'interface pour smartphone afin de piloter à distance des cartes Arduino ou Raspberry.

Proteus est composé de différents packages qui sont: Proteus PCB pour le circuit imprimé, Proteus VSM pour la simulation, Proteus Visual Designer/IoT Builder pour Arduino/Raspberry pour développer des projets comparables à ceux conçus avec des outils tels que Scratch et App inventor.

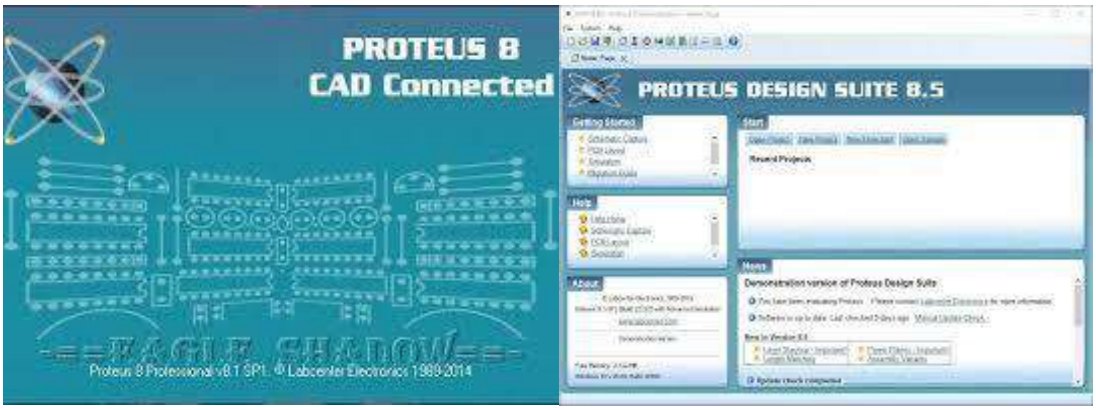


Figure 3.16 : interface du logiciel Proteus 8 Profissional

La simulation d'un système de commande électronique des moteurs est nécessaire avant la réalisation de ce système.
Elle permet de vérifier le bon fonctionnement du système et d'éviter l'endommagement des composants constituant dudit système.
Dans notre étude, nous avons simulé le système de commande de trois moteurs pas à pas à l'aide du logiciel Proteus 8 Professionnel.

Proteus est une suite logicielle destinée à l'électronique. Développé par la société L'absenter Electroniques, les logiciels incluent dans Proteus permettent la conception assistée par ordinateur (CAO) dans le domaine électronique.

Deux logiciels principaux composent cette suite logicielle : ISIS, ARES, PROSPICE et VSM. Cette suite logicielle est très connue dans le domaine de l'électronique. De nombreuses entreprises et organismes de formation utilisent cette suite logicielle. Outre la popularité de l'outil, Proteus possède d'autres avantages

- Pack contenant des logiciels facile et rapide à comprendre et utiliser ;
- Le support technique est performant ;
- L'outil de création de prototype virtuel permet de réduire les coûts matériel et logiciel lors de la conception d'un projet ;

Dans notre projet, PROTEUS nous a permis de vérifier le bon fonctionnement des moteurs et de choisir les connexions propices entre les moteurs et la carte ARDUINO.

3.5 Système de commande électronique

Le système de commande électronique est composé d'une carte ARDUINO, des moteurs pas à pas, et de driver

La carte Arduino

Elle est considérée comme un grand équipement électronique pour les amateurs ainsi que les professionnels. L'ARDUINO est un puissant ordinateur à carte unique avec une utilisation facile à adapter.

C'est une open source, ce qui signifie que vous devez payer son matériel et le logiciel requis est gratuit. Son logiciel est basé sur la puce ATMEGA [10].

3.5.1.1 Arduino mega 2560 :

Dans ce projet, nous utiliserons une carte **Arduino mega2560**

- **Les caractéristiques de l'Arduino Mega 2560**

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560 (fiche technique).

Cette carte dispose

- De 54 (0-53) broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- De 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- De 4 UART (port série matériel),
- D'un quartz 16Mhz,
- D'une connexion USB,
- D'un connecteur d'alimentation jack,
- D'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- Et d'un bouton de réinitialisation (reset).

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur ; Pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

La carte Arduino Mega 2560 est compatible avec les circuits imprimés prévus pour les cartes Arduino Uno, Duemilanove ou Diecimila.

3.5.1.2 Le microcontrôleur

Le contrôleur de notre robot est **ATmega2560** qui inclut dans la carte **ARDUINO MEGA2560**.

3.5.1.3 Les avantage de la carte Arduino

La carte **ARDUINO** est caractérisée par plusieurs points positifs, peut-être les plus importants :

- Elle n'est pas chère ;
- Environnement de programmation clair et simple ;
- Multiplateforme : utilisable sous Windows, Macintosh et Linux ;
- Nombreuses librairies disponibles avec diverses fonctions implémentées ;
- Logiciel et matériel open source et extensible ;
- Nombreux conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, site personnel etc.…) ;

3.5.1.4 Logiciel de programmation d'ARDUINO (Arduino IDE)

L'environnement de programmation Arduino (IDE en anglais) est une application écrite en Java. L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte. Le langage de programmation de l'Arduino étant dérivé du C et de C++, il respecte les règles de syntaxe propres à ces langages qui sont, où demeurant, relativement simple.

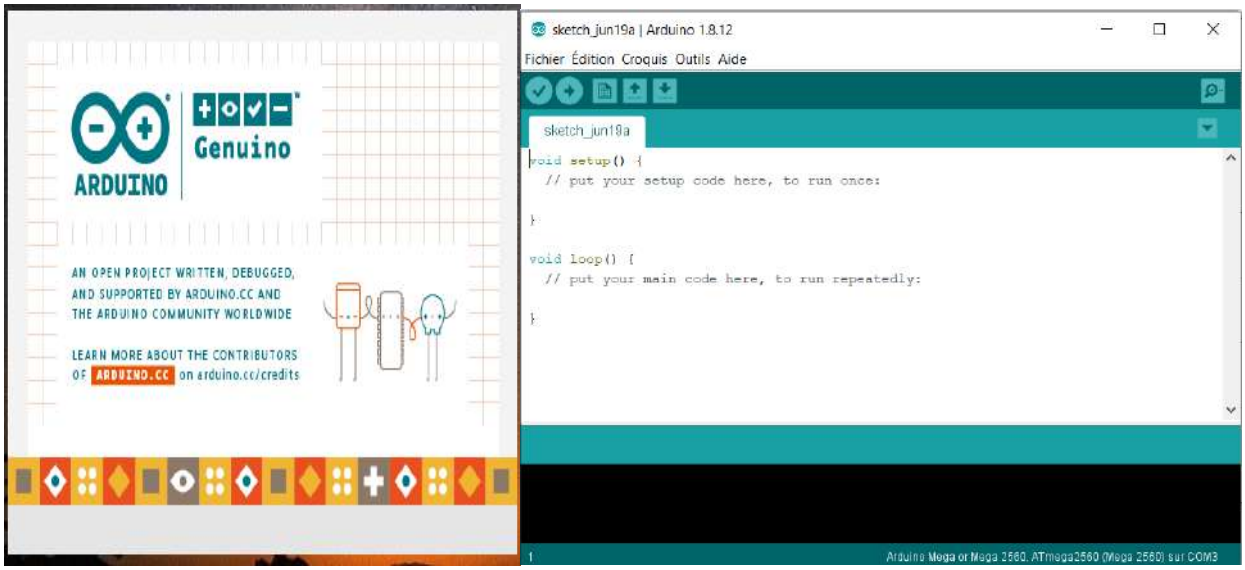


Figure 3.17 : l'interface de l'Arduino IDE(https://www.arduino.cc/en/Main/Software)

3.5.2 Les actionneurs

Chaque articulation du robot manipulateur est actionnée par un actionneur. Les actionneurs sont des dispositifs qui faire bouger le robot. Les actionneurs couramment utilisés sont :

- Moteurs pas à pas ;
- Servomoteurs à courant continu ;
- Servomoteurs à courant alternatif ;
- Pistons hydrauliques ;
- Pistons pneumatiques.

3.5.2.1 Moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas sont des moteurs spéciaux utilisés pour commander avec une grande précision le déplacement et la position d'un objet. Comme leur nom indique, ces moteurs tournent par incréments discrets. Chaque incrément de rotation est provoqué par une impulsion de courant fournie à l'un des enroulements du stator. [11]

Selon sa construction, un moteur pas à pas peut avancer de 90°, 45°, 18°, ou d'une fraction de degré seulement par impulsion. En faisant varier la fréquence des impulsions, on peut faire tourner le moteur très lentement, d'un pas à la fois, ou rapidement à des vitesses aussi élevées que 4000 tr/min. [11]

Avant de commencer à coder un moteur pas à pas, il est nécessaire de comprendre le concept de fonctionnement ou de rotation du moteur pas à pas. Étant donné que le stator en mode pas à pas est constitué de différentes paires de bobines, chaque paire de bobines peut être excitée selon différentes méthodes, ce qui permet de piloter les modes dans de nombreux modes différents.

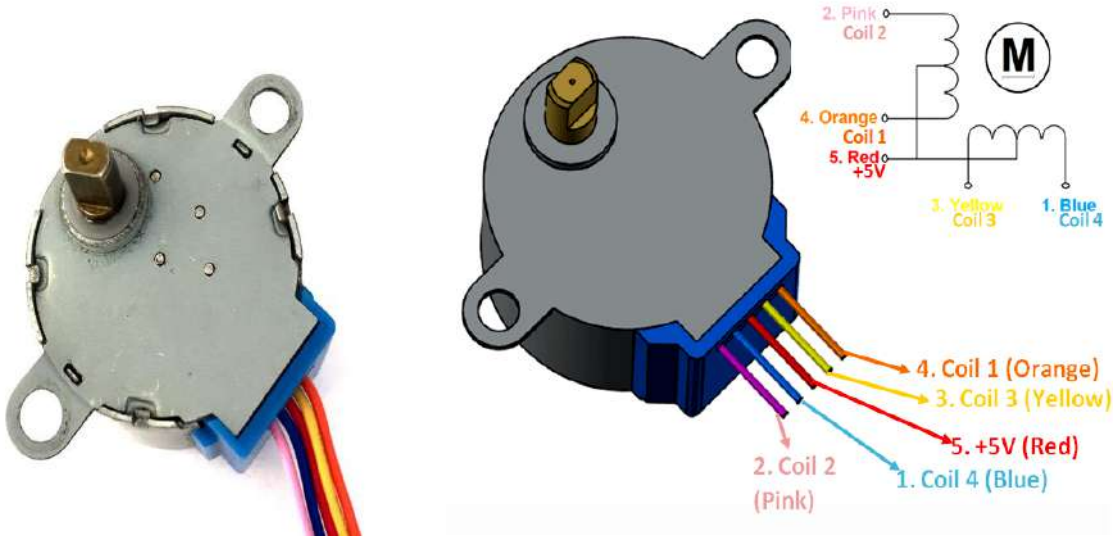


Figure 3.18 : Moteur pas à pas, type 28BJY-48

Le circuit imprimé du pilote de moteur pas à pas ULN2003 fournit une interface d'entraînement directe entre le microcontrôleur et le moteur pas à pas. Le circuit imprimé fournit quatre entrées pour la connexion au microcontrôleur, alimentation connexion 52

Pour la tension du moteur pas à pas, et cavalier ON / OFF, un collecteur de moteur pas à pas à connexion directe et quatre voyants pour indiquer l'état de progression.

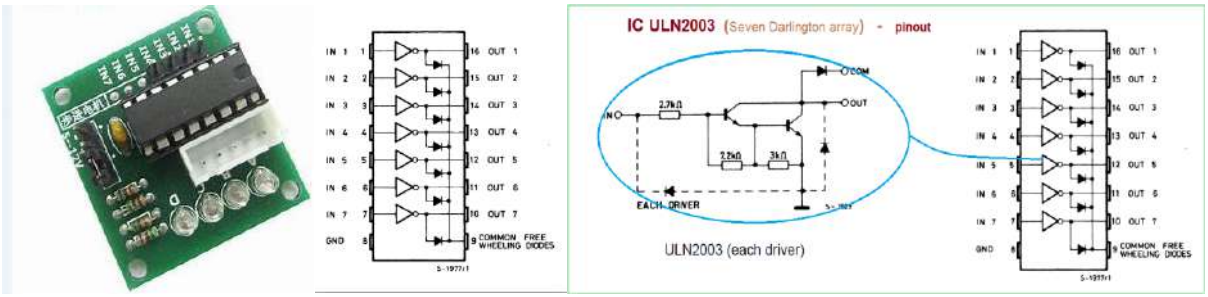


Figure 3.19 : ULN2003 driver pour Controller les moteurs pas à pas

Pour simuler le circuit électronique de notre projet nous devons suivre les étapes suivantes :

- Nous écrivons le code de contrôle du robot dans l'environnement d'Arduino IDE ;

- On vérifier et exécuter le code ;
- Copier le lien d'exécution forma « **ino.hex** » ;

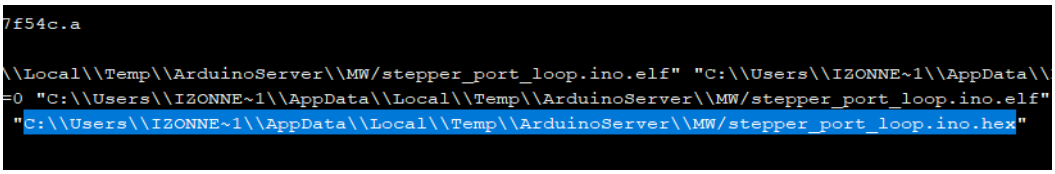


Figure 3.20 : lien de code de contrôle.

- Préparer le schéma (le circuit électrique) dans logiciel « Proteus 8 » ;
- Coller le lien de code de contrôle dans les configurations (program file) de la carte Arduino ;

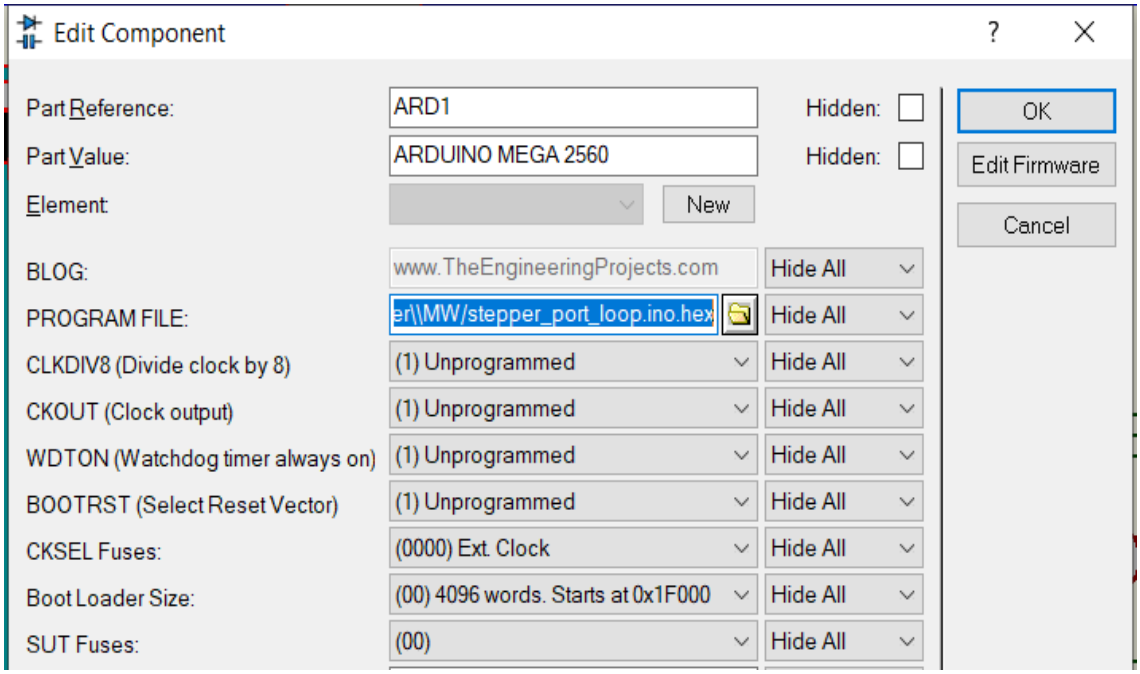


Figure 3.21 : configuration de la carte Arduino

- Exécuter la simulation du circuit électrique ;

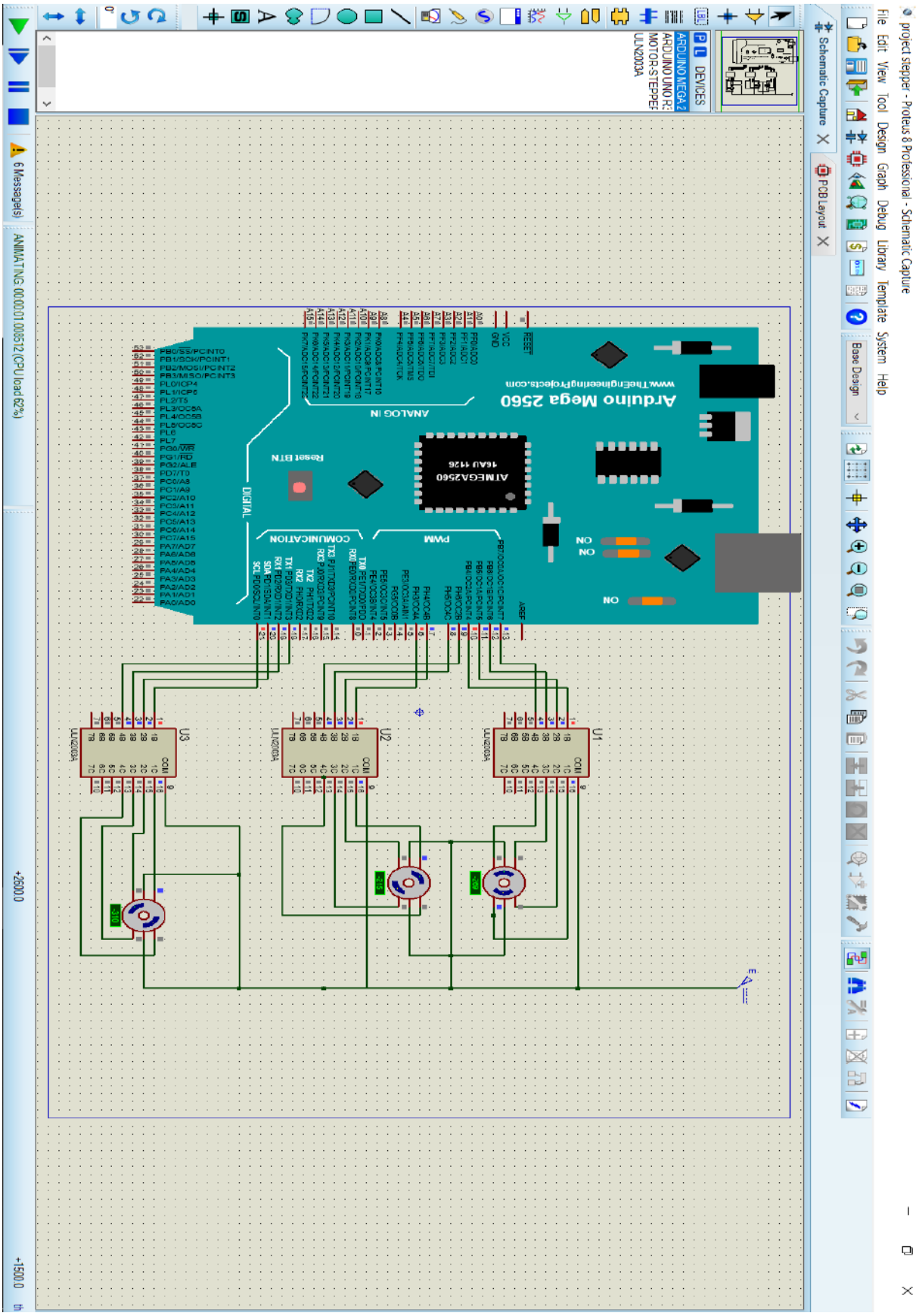


Figure 3.22: simulation électrique du circuit électronique

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles utilisés pour décrire les mouvements des articulations d'une structure ouverte simple, ensuite, nous avons établis les différents modèles mathématiques permettant la programmation et le contrôle du robot.

Après la conception de la maquette du robot par le logiciel SolidWorks, nous avons développé un programme de simulation par l'utilisation du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats de simulation ont montré l'exactitude des modèles établis et le bon fonctionnement du robot.

Conclusion générale

Le présent travail a pour objectif de développer un robot SCARA type PRR. Pour ce faire, nous avons proposé une méthodologie pour simplifier le processus de développement de ce robot.

La démarche suivie comporte les grandes étapes suivantes :

(i) établissement des différents modèles (direct et inverse) : géométrique, cinématique et dynamique. Ces modèles permettent de programmer et contrôler le robot ;

(ii) conception de la maquette du robot par l'utilisation du logiciel SolidWORKS ;

(iii) simulation du système mécanique par l'utilisation de la maquette du robot et du logiciel SIMULINK/MATLAB afin de vérifier l'exactitude des modèles établis et le bon fonctionnement du robot ;

(iv) simulation du système électronique de commande par l'utilisation du logiciel PROTEUS qui nous a aidé au choix sûr entre les connexions des moteurs et celles de la carte ARDUINO et au développement progressif des programmes sous MATLAB et sous l'environnement IDE de la carte ARDUINO. ;

Enfin de ce projet, nous avons testé notre robot pour plusieurs situations désirées de l'organe terminal. Les résultats issus de ces tests ont montré que les situations de l'organe terminal calculées par le programme de simulation et celles issues du mouvement du robot sont identiques. Ceci signifie l'exactitude des modèles établis et l'efficacité de la méthodologie proposée pour le développement du robot.

A travers cette étude, le projet réalisé nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques et pratiques dans le domaine des robots qui envahissent les différents domaines de l'activité humaine.

Références bibliographiques

[1] Introduction _a la robotique, Licence 1ere année - 2011/2012, Laetitia Matignon GREYC-CNRS Université de Caen, France

[2] Jean-Louis Boimond, Robotique, Université Angers année 2009.

[3] Arbouche Kaddour, commande adaptative du robot manipulateur rigide, Mémoire de master univ-Khemis Miliana, 2015

[4] Alper Erdem Demirci, design and analysis of a scara robot, Décembre, 2012

[5] Fodil Rosa, Sayah Kenza, Réalisation et Commande d'un Bras manipulateur à Quatre Degrés de liberté, Mémoire de master, universite de boumerdes, Juin 2017 .

[6] R. Gourdeau, ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs, Mémoire de master, Ecole Polytechnique de Montréal, 2010.

[7] Mohammed amine DJEDDOU : Conception et analyse d'un robot SCARA, Mémoire de master, Université de Médéa, 2019.

[8] Fernini Brahim, Etude, Analyse Et Modélisation Des Robots Manipulateurs Application Aux Robots Sériels, thèse de doctorat, Université de Blida, juin 2017.

[9] MAKHLOUFI Fateh, Modélisation Et Commande Des Robots Manipulateurs Par Les Outils De L'intelligence Artificielle, thèse de doctorat, Université de Annaba, 2015.

[10] Arduino : A Complete Guide (Par Tech Guru) ; Auteur : Tech Guru.

[11] Djoudi Achraf, Analyse des structures et méthodes de calcul de la portée d'un robot, Mémoire de master, Université de Biskra, 2017.

[12] Takhi Hocine et Attachi Redouane Cherif, Conception et réalisation d'un robot mobile à base d'Arduino, Mémoire de master, Université de Laghouat 2015.

[13] Erik Bartmann, le grande livre d'arduino 2eme Edition.

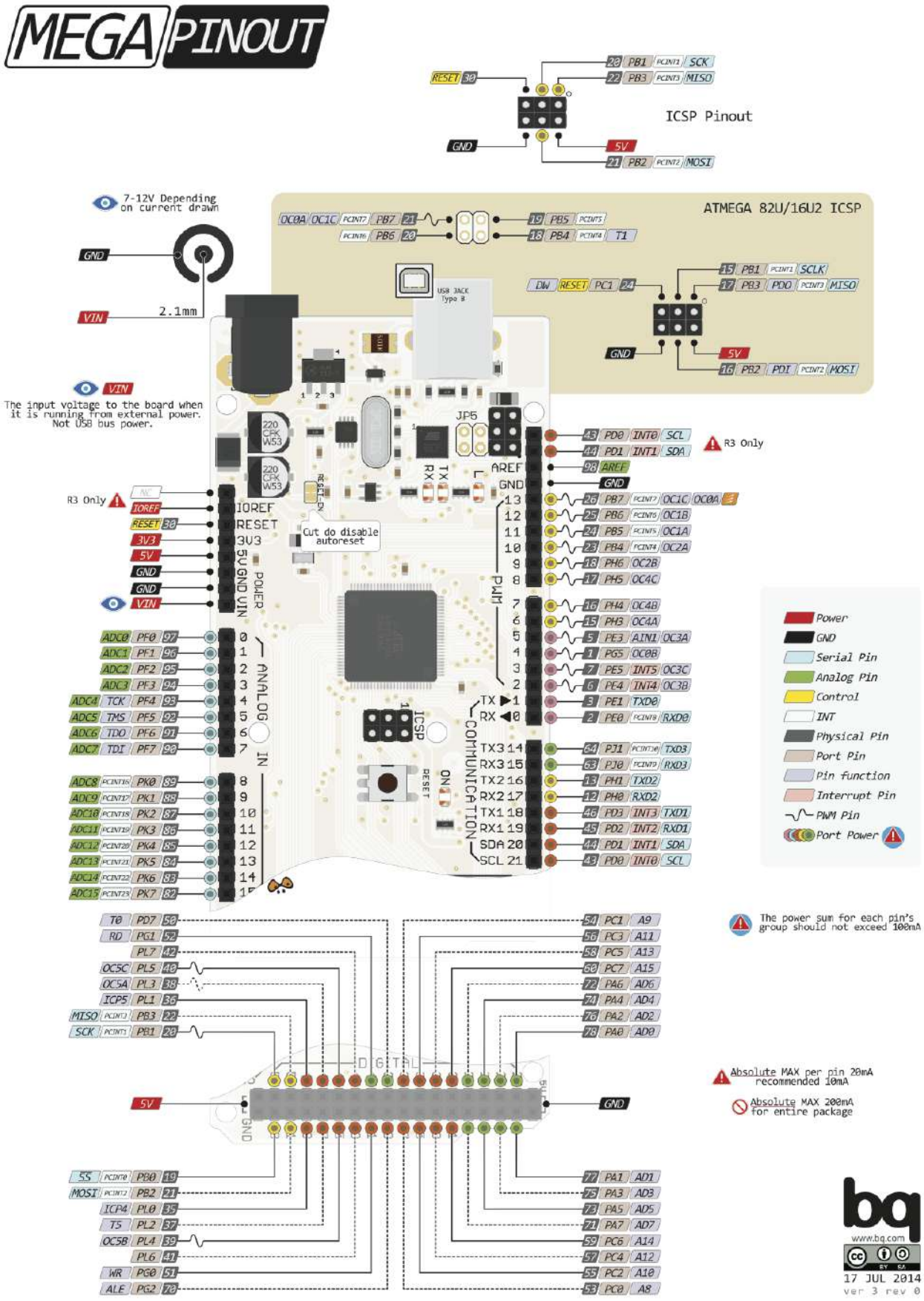
[14] http//www. ORBIT ELECTRONIC-dz/stepper Motors, 28BJY-48.com

Annexe

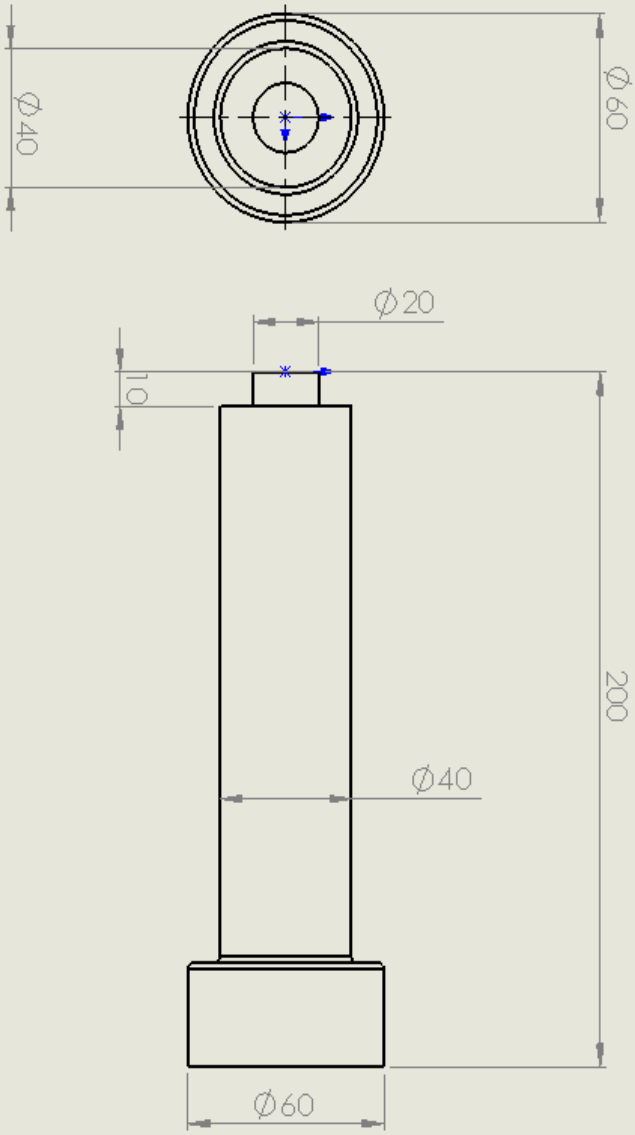
A.1 Les caractéristiques de la carte Arduino (Arduino Mega 2560)

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5 V
Tentions d’alimentation (recommandée)	7-12 V
Tentions d’alimentation (limites)	6-20 V
Broches E/S numérique	54 (dont 14 disposent d'une sortie PWM)
Broches entrées analogiques	16 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5 V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3 V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5 V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	256 KB dont 8 KB sont utilisés par le bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire volatile)	4 KB
Vitesse d’horloge	16 MHz

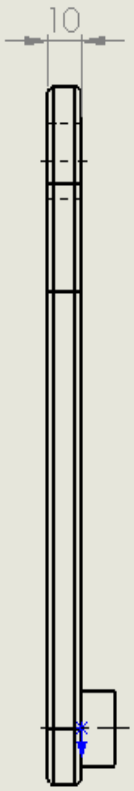
Tableau A-1 . Caractéristique de la carte Arduino mega 2560

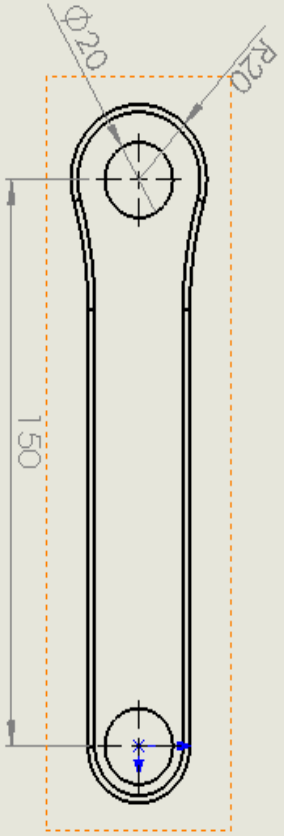


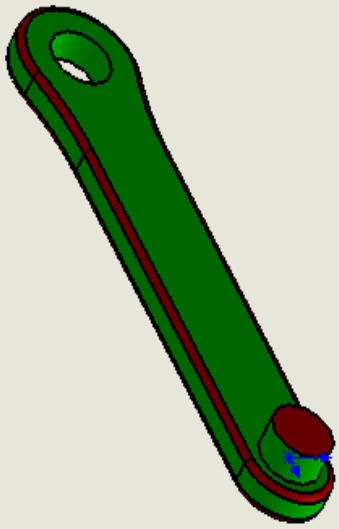
Ports Arduino Mega 2560 (Equivalent for PORTB in Arduino Mega 2560)

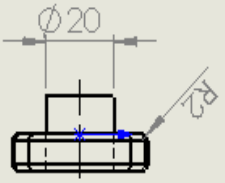


UNIVERSITE Dr.YAHIA FARES DE MEDEA		
DESSIN	PART 1 ASSEM	Mécatronique
M2 G.M.		ECH 1:2
30-05-2020	PART 01 (BASE)	

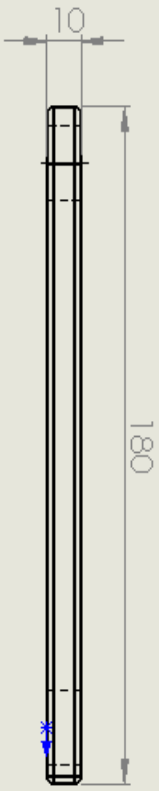


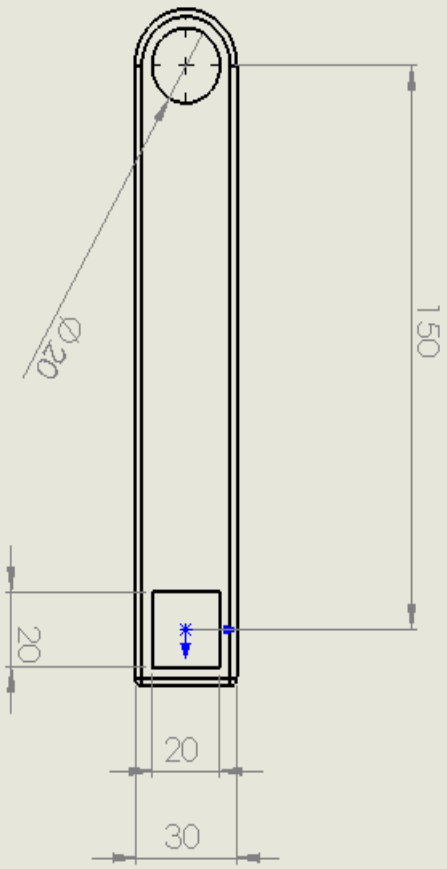


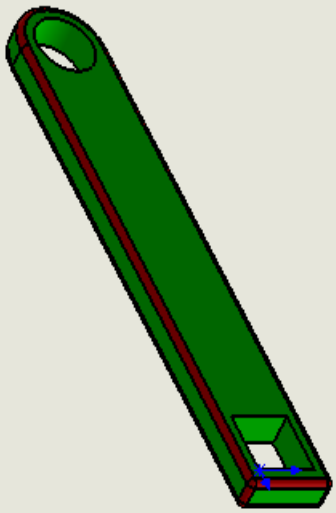


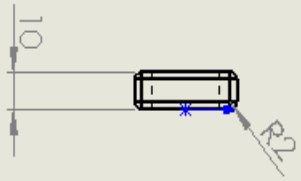


UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MEDEA		
DESSIN	PART 02 ASSEM	Mécatronique
M2 G.M.		ECH 1:2
30-05-2020	PART 02	

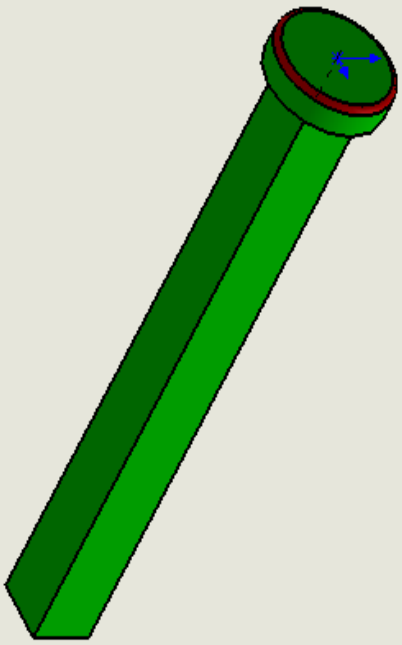


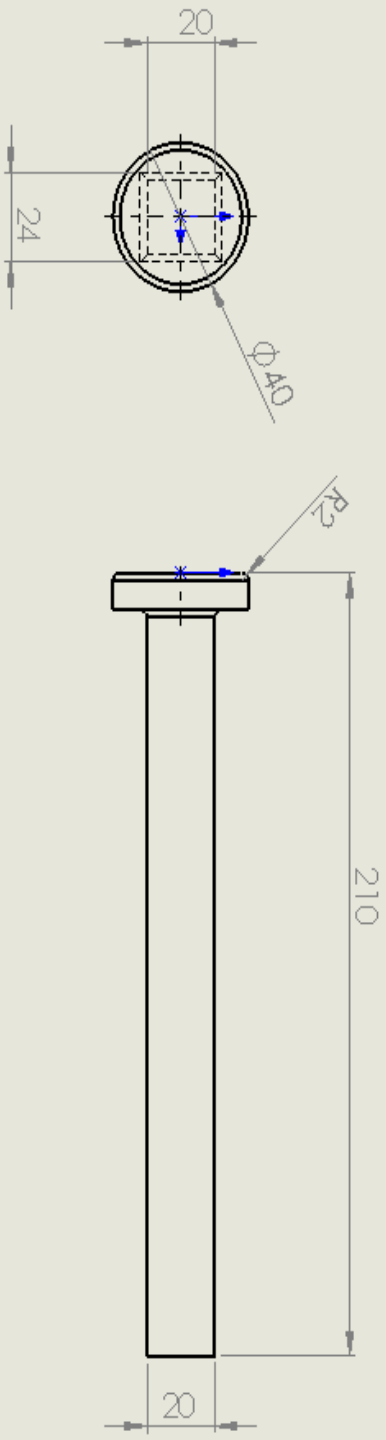




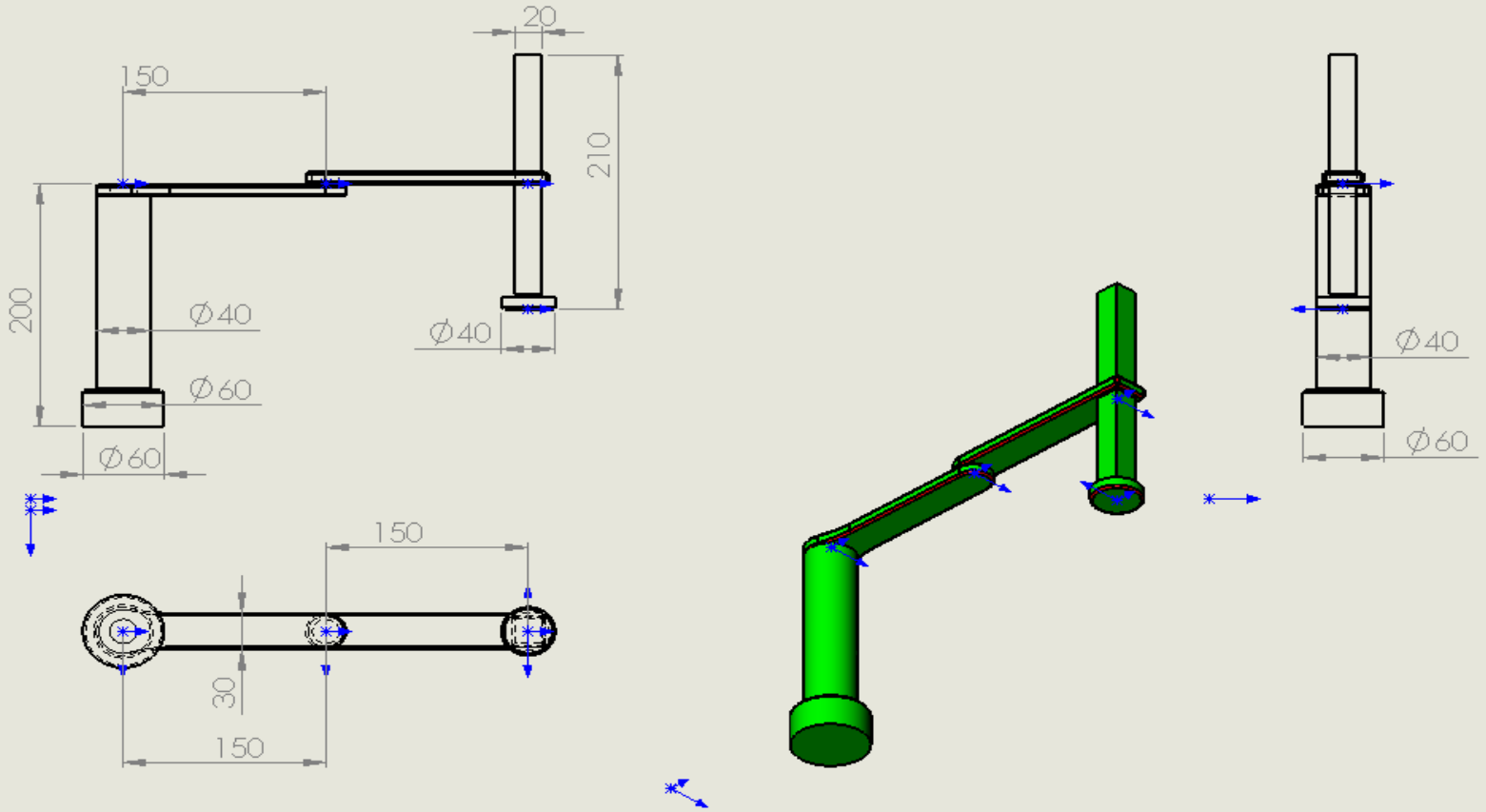


UNIVERSITE Dr.YAHIA FARES DE MEDEA		
DESSIN	PART 03 ASSEM	Mécatronique
M2 G.M.		ECH 1:2
30-05-2020	PART 03	





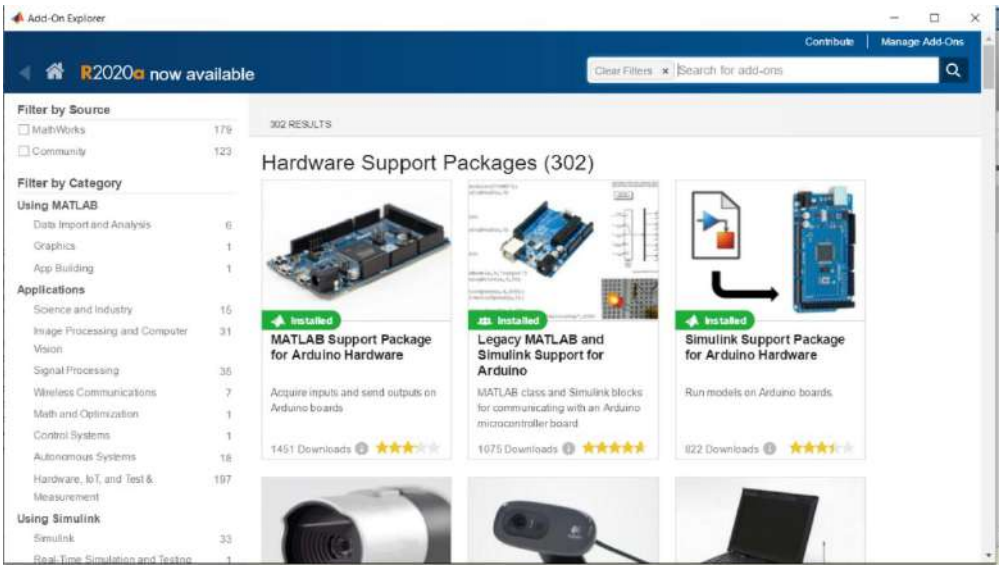
UNIVERSITE Dr.YAHIA FARES DE MEDEA		
DESSIN	PART 04 ASSEM	Mécatronique
M2 G.M.		ECH 1:2
30-05-2020	PART 04 (BASE)	



UNIVERSITE Dr.YAHIA FARES DE MEDEA		
DESSIN	RRP ASSEM	mécatronique
M2 G.M.		ECH 1:5
30-05-2020	SCARA ROBOT	

A.2 Contrôlez directement le robot avec MATLAB

Nous pouvons contrôler le robot avec **MATLAB** directement sans avoir besoin d'ouvrir l'environnement **IDE**, en installant un environnement de développement d'**Arduino** dans **MATLAB,** à partir de 'Command Window' de MATLAB, on choisit « ADD-ONS / Get hardware supporte packages »



- **Exemple de commande l'Arduino avec MATLAB**

