

**Université 8 Mai 1945 - Guelma -  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE  
Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Option : Construction Mécanique**

**Présenté par : BOURBOUNA Madjed**

---

---

**Modélisation géométrique, cinématique et  
conception sous SolidWorks d'un robot à 4  
axes de type SCARA**

=====

Sous la Direction de :

Pr. DJEBALA Abderrazek

Dr. FRIHI Djamel

**JUIN 2024**

# REMERCIEMENTS

Le grand remerciement revient à Dieu, pour nous avoir accordé l'opportunité et la force de mener à bien ce travail.

En premier lieu, je remercie chaleureusement mes directeurs de recherche, **Pr. Djebala Abderrazek** et **Dr. Djamel Frihi**, pour leur soutien indéfectible, leurs conseils avisés et leur patience tout au long de ce travail. Leurs connaissances approfondies et leur rigueur scientifique ont été une source d'inspiration constante.

Un grand merci à mes collègues et amis, pour leurs encouragements, Leur soutien moral et leurs discussions stimulantes ont été essentiels.

Je suis également reconnaissant envers ma famille, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de ces années d'études. Leur confiance en moi m'a donné la force de persévérer.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à la collecte des données, ainsi que tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

# DEDICACES

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices incommensurables. Vous êtes mes piliers et ma motivation quotidienne.

À mes frères et ma grande sœur, pour leurs encouragements et leur présence joyeuse qui illuminent mes journées.

À mes encadrants, pour leur expertise, leur patience et leur guidance précieuse tout au long de ce parcours. Votre enseignement a enrichi ma compréhension.

À mes amis, pour leur amitié sincère, et les précieux moments partagés. Vous êtes une source de force et de joie dans cette aventure.

Cette réussite est le fruit de notre collaboration, de votre dévouement et de notre engagement commun envers le savoir et la recherche. Merci du fond du cœur.

## Résumé

Ce mémoire présente une étude complète sur la modélisation et la conception d'un robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot) à 4 axes. Cette étude se compose de deux parties : La première partie se concentre sur la modélisation robotique, couvrant les aspects géométriques et cinématiques du robot SCARA. Cette phase comprend l'utilisation de concepts clés de la modélisation pour établir des modèles précis. Un programme Matlab combiné à la boîte à outils de Peter Corke, est utilisé pour visualiser les mouvements 3D de la position de l'organe terminal du robot. Dans la deuxième partie, l'accent est mis sur la conception effective du robot SCARA. Cette étape implique la création et l'assemblage de ses composants à l'aide du logiciel SolidWorks. Pour valider le fonctionnement du robot, des simulations sont réalisées et certains résultats sont extraits à l'aide de SolidWorks et Méca3D.

**Mots-clés** : Robot SCARA, Modélisation robotique, Géométrie, Cinématique, Matlab, Conception de robots, SolidWorks, Simulation, Méca3D.

## Abstract

This dissertation presents a complete study on the modeling and design of a 4-axis SCARA (Selective Compliance Assembly Robot) robot. The study consists of two parts: The first part focuses on robotic modeling, covering the geometric and kinematic aspects of the SCARA robot. This phase includes the use of key modeling concepts to establish accurate models. A Matlab program combined with Peter Corke's toolbox is used to visualize the 3D movements of the position of the robot's end organ. In the second part, the focus is on the actual design of the SCARA robot. This step involves the creation and assembly of its components using SolidWorks software. To validate the operation of the robot, simulations are carried out and certain results are extracted using SolidWorks and Méca3D.

**Keywords:** SCARA robot, Robotic modeling, Geometric, Kinematic, Matlab, Robot design, SolidWorks, Simulation, Méca3D.

## ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة كاملة عن نمذجة وتصميم روبوت SCARA رباعي المحاور (روبوت تجميع الامتثال الانتقائي). تتكون هذه الدراسة من جزأين: الجزء الأول يركز على النمذجة الروبوتية، ويغطي الجوانب الهندسية والحركية للروبوت SCARA. تتضمن هذه المرحلة استخدام مفاهيم النمذجة الأساسية لإنشاء نماذج دقيقة. يتم استخدام برنامج Matlab مع صندوق أدوات Peter Corke لتصوير الحركات ثلاثية الأبعاد لموضع العضو النهائي للروبوت. وفي الجزء الثاني، يتم التركيز على التصميم الفعلي لروبوت SCARA. تتضمن هذه الخطوة إنشاء وتجميع مكوناته باستخدام برنامج SolidWorks ، للتحقق من صحة تشغيل الروبوت يتم إجراء عمليات المحاكاة واستخراج نتائج معينة باستخدام SolidWorks وMéca3D.

**الكلمات المفتاحية:** روبوت سكارا، النمذجة الروبوتية، الهندسية، الحركية، Matlab، تصميم الروبوت، SolidWorks، المحاكاة، Méca3D

# Sommaire

Liste des figures.....	-
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les robots</b>	
1. Introduction.....	2
2. Définitions.....	2
3. Historique.....	2
4. Constituants mécaniques des robots.....	4
4.1. Base.....	4
4.2. Le porteur.....	5
4.3. Organe terminal (effecteur).....	5
5. Les éléments constitutifs d'un robot.....	5
5.1. Unité informationnelle.....	5
5.2. Unité opérationnelle.....	5
6. Caractéristiques d'un robot.....	6
7. Les différents types des robots.....	6
7.1. Les robots cartésiens.....	6
7.2. Les robots parallèles.....	6
7.3. Les robots cylindriques.....	7
7.4. Les robots sphériques.....	7
7.5. Le robot SCARA.....	8
8. Classification des robots.....	9
8.1. Classification fonctionnelle.....	9
8.2. Classification géométrique.....	10
9. Domaine d'application des robots.....	12
9.1. Robots industriels.....	13
9.2. L'industrie agro-alimentaire.....	14
9.3. Robots dans les biotechnologies.....	14
9.4. Robots d'exploration.....	15
9.5. Robots de service.....	16
9.6. Robot de loisirs.....	17
10. L'avenir de la robotique et des systèmes automatisés.....	17
11. Conclusion du chapitre.....	18
<b>Chapitre 2 Modélisation des robots</b>	
1. Introduction.....	19
2. Modélisation géométrique.....	19
2.1. Description géométrique.....	19
2.2. Méthode de Denavit-Hartenberg.....	19
2.3. Méthode de Khalil et Kleinfinger.....	21
2.4. Représentation des coordonnées opérationnelles.....	22
2.5. Modèle géométrique direct.....	23
2.6. Modèle géométrique inverse.....	23
3. Modélisation cinématique.....	25
3.1. Modèle cinématique direct.....	25
3.2. Calcul la matrice Jacobienne analytique.....	25
3.3. Calcul la matrice Jacobienne cinématique.....	26
3.4. Utilisation de la matrice jacobienne.....	27
3.5. Modèle cinématique inverse.....	27

4.	Modélisation dynamique.....	27
4.1.	Modélisation dynamique inverse.....	27
4.2.	Modélisation dynamique directe.....	28
5.	Conclusion du chapitre.....	29

**Chapitre 3 Modélisation géométrique et cinématique d'un robot SCARA**

1.	Introduction.....	30
2.	Généralités sur les robots SCARA.....	30
2.1.	Une chronique de l'évolution du robot SCARA.....	30
2.2.	Définition.....	30
2.3.	La configuration.....	30
2.4.	Les composants.....	30
2.5.	Caractéristiques principales.....	31
2.6.	Les différentes tâches du robot SCARA.....	32
2.7.	Les Avantages et les inconvénients des robots SCARA.....	33
3.	Description du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx.....	33
4.	Modélisation géométrique du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx.....	34
4.1.	Modélisation géométrique direct du robot.....	35
4.2.	Modélisation géométrique inverse.....	36
5.	Simulation du MGD sous Matlab.....	38
6.	Modélisation cinématique du robot SCARA.....	41
6.1.	Utilisation de la matrice Jacobienne analytique.....	41
6.2.	Utilisation de la matrice Jacobienne cinématique.....	41
7.	Conclusion.....	45

**Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D**

1.	Introduction.....	46
2.	Présentation du logiciel SolidWorks (SW).....	46
3.	Conception du robot SCARA.....	47
4.	Création des contours de trajectoire relatifs aux espaces de travail.....	50
5.	Etude cinématique, sous SolidWorks Motion, du robot SCARA.....	51
5.1.	Description du modèle.....	51
5.2.	Simulation sous SolidWorks.....	51
5.3.	Etapas de la simulation.....	52
6.	Etude cinématique et géométrique sous MECAD3D, complément de SolidWorks.....	57
6.1.	Présentation du MECA3D.....	57
6.2.	Optimisation par MECA3D du robot SCARA.....	58
6.3.	Définition du modèle cinématique.....	58
6.4.	Simulation, par MECA3D, du comportement cinématique et géométrique du robot SCARA.....	59
7.	Conclusion du chapitre.....	68



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1

Figure 1.1 :	L'écrivain Tchèque Karel Capek .....	4
Figure 1.2 :	Robot Unimate.....	4
Figure 1.3 :	Robot Puma.....	4
Figure 1.4 :	Robot Hilare.....	5
Figure 1.5 :	Robot Shakey.....	5
Figure 1.6 :	Robot Spirit.....	5
Figure 1.7 :	Robot Curiosity.....	5
Figure 1.8 :	Les vocabulaires du robot.....	5
Figure 1.9 :	Structure fonctionnelle d'un robot.....	6
Figure 1.10 :	Fiche technique d'un robot industriel.....	7
Figure 1.11 :	Robot Toshiba.....	8
Figure 1.12 :	Robot Comau.....	8
Figure 1.13 :	Robot Seiko.....	9
Figure 1.14 :	Robot Fanuc.....	9
Figure 1.15 :	Robots SCARA.....	9
Figure 1.16 :	Manipulateur à commande manuelle.....	10
Figure 1.17 :	Manipulateur à cycle pré-réglé.....	10
Figure 1.18 :	Robot programmable.....	11
Figure 1.19 :	Robot intelligent.....	11
Figure 1.20 :	Structure d'un robot cartésien.....	12
Figure 1.21 :	Structure d'un robot cylindrique.....	12
Figure 1.22 :	Structure d'un robot sphérique.....	12
Figure 1.23 :	Structure d'un robot 3R.....	13
Figure 1.24 :	Structure d'un robot SCARA.....	13
Figure 1.25 :	Robots industriels de soudage.....	14
Figure 1.26 :	Robots Industriels d'Assemblage Nissan.....	15
Figure 1.27 :	Robots Industriels d'Emballage / Palettisation.....	15
Figure 1.28 :	Robot agro-alimentaire.....	16
Figure 1.29 :	Robot chirurgical.....	16
Figure 1.30 :	Robots d'exploration spatiale.....	17
Figure 1.31 :	Robots d'exploration des mers.....	17
Figure 1.32 :	Robots de Service aux Humains.....	18
Figure 1.33 :	Robot de service aux équipements.....	18
Figure 1.34 :	Robot de loisirs.....	18

### Chapitre 2

Figure 2.1 :	Robot série à chaîne cinématique ouverte.....	21
Figure 2.2 :	Notation de Denavit-Hartenberg.....	22
Figure 2.3 :	Notation de Khalil et Kleinfinger.....	23
Figure 2.4 :	Manipulateur à 2 ddl évoluant dans le plan.....	25
Figure 2.5 :	Modèle cinématique direct.....	26

### Chapitre 3

Figure 3.1 :	Robot SCARA.....	32
Figure 3.2 :	Structure du robot SCARA.....	32
Figure 3.3 :	Caractéristiques principales d'un robot SCARA (Fanuc).....	33
Figure 3.4 :	Robot SCARA à 4 degrés de liberté MITSUBISHI RH-6SDH35xx.....	34
Figure 3.5 :	Les dimensions du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx.....	35

Figure 3.6 :	Espace de travail du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx.	35
Figure 3.7 :	Schéma d'un robot SCARA montrant l'affectation des repères.....	36
Figure 3.8 :	Vue de dessus du robot SCARA.....	38
Figure 3.9 :	Simulation sur MATLAB, position 1.....	40
Figure 3.10 :	Simulation sur MATLAB, position 2.....	40
Figure 3.11 :	Simulation sur MATLAB, position 3.....	41
Figure 3.12 :	Simulation sur MATLAB, position 4.....	41

#### **Chapitre 4**

Figure 4.1 :	Arbre de construction dans un fichier assemblage 'Cas du robot SCARA '.....	46
Figure 4.2 :	Etapas de création de l'assemblage des pièces du robot SCARA....	46
Figure 4.3 :	Interface SolidWorks.....	47
Figure 4.4 :	Configuration Manager.....	47
Figure 4.5 :	Property Manager.....	47
Figure 4.6 :	Les dimensions du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx...	48
Figure 4.7 :	Dessin du corps fixe (bâti).....	48
Figure 4.8 :	Assemblage segment 1/corps.....	49
Figure 4.9 :	Assemblage segment 1/segment 2.....	49
Figure 4.10 :	Assemblage l'effecteur/segment 2.....	50
Figure 4.11 :	Le Robot SCARA complet.....	50
Figure 4.12 :	Contour de trajectoire/plan 01.....	51
Figure 4.13 :	Contour de trajectoire/plan 02.....	51
Figure 4.14 :	Analyse de mouvement dans SolidWorks Motion.....	51
Figure 4.15 :	Assemblage des éléments de base du robot SCARA.....	52
Figure 4.16 :	Exécution de la simulation.....	53
Figure 4.17 :	Variations de la vitesse et de l'accélération d'un point appartenant au segment 2.....	55
Figure 4.18 :	Variations de la vitesse et de l'accélération d'un point appartenant à l'effecteur.....	55
Figure 4.19 :	Trajectoire d'effecteur/plan 1.....	56
Figure 4.20 :	Paramètres de la vitesse et de l'accélération du segment 2.....	56
Figure 4.21 :	Paramètres de la vitesse et de l'accélération de l'effecteur.....	57
Figure 4.22 :	Trajectoire d'un point appartenant à l'effecteur\plan02.....	57
Figure 4.23 :	Graphe de structure du robot SCARA.....	59
Figure 4.24 :	Trajectoire d'un point\segment 1.....	61
Figure 4.25 :	Trajectoire d'un point\segment 2.....	61
Figure 4.26 :	Trajectoire d'un point\ effecteur	62
Figure 4.27 :	Exemple de résultats obtenu par MECA3D (vitesses d'un point appartenant à l'effecteur).....	63
Figure 4.28 :	Vitesse angulaire de segment 1.....	64
Figure 4.29 :	Vitesse angulaire de segment 2.....	64
Figure 4.30 :	Vitesse de l'effecteur.....	65
Figure 4.31 :	Accélération angulaire de segment 1.....	65
Figure 4.32 :	Accélération de segment 2.....	65
Figure 4.33 :	Accélération de l'effecteur.....	65
Figure 4.34 :	Courbe de position segment 1.....	66
Figure 4.35 :	Courbe de position segment 2.....	66
Figure 4.36 :	Courbe de position d'effecteur.....	66
Figure 4.37 :	Vitesse de rotation pivot 1.....	67
Figure 4.38 :	Vitesse de rotation pivot 2.....	67

Figure 4.39 :	Vitesse de rotation pivot 2.....	<b>67</b>
Figure 4.40 :	Courbe de position segment 1.....	<b>67</b>
Figure 4.41 :	Courbe de position segment 2.....	<b>67</b>
Figure 4.42 :	Courbe de position de l'effecteur.....	<b>68</b>

## Introduction générale

La robotique, un domaine à la croisée de l'ingénierie, de l'informatique et de l'intelligence artificielle, joue un rôle de plus en plus crucial dans le monde moderne. Depuis ses débuts modestes avec des automates mécaniques simples, la robotique a évolué pour devenir une force motrice de l'innovation technologique. Aujourd'hui, les robots sont omniprésents dans divers secteurs, des usines de fabrication aux hôpitaux, en passant par les explorations spatiales et les services domestiques.

L'un des développements les plus remarquables dans ce domaine est le robot SCARA, qui se distingue par sa capacité à exécuter des mouvements précis et flexibles. Dans ce contexte, la modélisation géométrique, cinématique et dynamique, ainsi que la conception, revêtent une importance capitale pour garantir le fonctionnement optimal de ces machines.

Ce mémoire se concentre donc sur la modélisation géométrique, cinématique, ainsi que sur la conception et la simulation sous SolidWorks d'un robot SCARA. Le but de cette étude est de fournir une compréhension approfondie des principes fondamentaux de la robotique appliqués à la conception et à la simulation d'un robot SCARA, tout en démontrant l'efficacité des outils de modélisation et de simulation modernes.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres distincts, chacun abordant un aspect clé de l'étude: Le chapitre 1 offre une vue d'ensemble de la robotique, couvrant son historique, ses applications actuelles et futures, ainsi que les différents types de robots utilisés dans l'industrie.

Dans le chapitre 2 nous examinons les fondements théoriques de la modélisation des robots. Nous y détaillons les modèles mathématiques utilisés pour décrire la géométrie, la cinématique et la dynamique des robots. Ces modèles sont essentiels pour comprendre comment le robot se déplace et interagit avec son environnement.

Le chapitre 3 est dédié à la modélisation du robot SCARA, où nous utilisons les fondements théoriques de la modélisation des robots. Dans ce contexte une modélisation géométrique et cinématique, directes et inverses, ont été réalisées. Une simulation de la modélisation géométrique a été réalisée sous Matlab avec la boîte à outils Peter Corke. Cette simulation permet de déterminer, en temps réel, la position de l'organe terminal du robot et ceci sans avoir recours à de longs calculs.

Le chapitre 4 traite la conception détaillée et la simulation du robot SCARA. Nous utilisons les outils de simulation de SolidWorks et Meca3D pour analyser le comportement du robot et vérifier ses performances et capacités dans différentes configurations.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale.

# Chapitre 1

## Généralités sur la robotique

### 1. Introduction

La robotique est un domaine scientifique qui englobe la construction, l'élaboration et la programmation des robots. Ces robots sont en contact direct avec le monde réel et sont souvent utilisés pour remplacer les humains et exécuter des tâches monotones et répétitives. L'objectif principal de la robotique est l'automatisation de l'activité humaine afin d'augmenter les facteurs de production et réduire le coût du facteur travail, surtout si le travail est effectué dans des zones dangereuses. Aujourd'hui ils sont présents dans nos maisons, lieux de travail et dans divers secteurs tels que la santé et l'industrie.

### 2. Définitions

Un robot est un dispositif qui associe la mécanique, l'électronique et l'informatique, composé d'éléments mécaniques articulés et d'éléments électroniques. Conçu pour accomplir automatiquement des tâches imitant ou remplaçant l'action humaine. Il existe de nombreuses définitions du mot robot sont récurrentes :

Selon le petit Larousse, « Un robot est défini comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable » [1].

Selon Robot Institute of America, « Un robot est un manipulateur reprogrammable à fonctions multiples. Il est conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des instruments spécialisés suivant des trajectoires variables programmées, en vue d'accomplir des tâches très diverses » [1].

Selon l'Association Japonaise de Robotique Industrielle, « Un robot est un mécanisme permettant d'effectuer, en tout ou en partie, une tâche normalement réalisée par l'homme » [1].

Selon l'International Standard Organisation (ISO), « Un robot est une machine formée par un mécanisme incluant plusieurs degrés de libertés, ayant souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet capable de tenir des outils, des pièces ou un dispositif d'inspection » [1].

### 3. Historique

Le concept de robot date de plusieurs siècles, mais le terme robot fut inventé par le tchèque Karel Capek (Figure 1.1) dans une pièce de théâtre écrite en 1920, R.U.R. ou les Robots Universels de Rossum". Ce terme est dérivé du verbe tchèque Robotat signifiant travail forcé ou corvée. Les réalisateurs d'automates depuis longtemps ont cherché à pouvoir insuffler à leurs machines des comportements adaptés aux circonstances.

Malheureusement, jusqu'au vingtième siècle, les techniques étaient trop primitives pour permettre de telles réalisations. En 1959, George Devol a inventé une machine originale, polyvalente et reprogrammable, ce qui a permis au robot d'acquérir une réalité industrielle. Mais

en fait ce ne fut que vers la fin des années 1970 que les robots industriels de première génération ont vu le jour [2].



Figure 1.1 : L'écrivain Tchèque Karel Capek [3]

### Robotique industrielle

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 complètement robotisée.

1978 : PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) développé par General Motors (toujours utilisé).



Figure 1.2 : Robot Unimate [4]



Figure 1.3 : Robot Puma [4]

### Premiers robots mobiles

1960-1964 : Ouverture des laboratoires d'Intelligence Artificielle au M.I.T, Stanford Research Institute (SRI), Stanford University, University of Edinburgh.

Fin des années 60 : Mise en place de "Shakey" premier robot mobile intégrant perception, planification et exécution.

1970 : Stanford Cart.

1977 : Premier robot mobile français HILARE au LAAS (CNRS Toulouse).

### Robots d'exploration

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

2009 : Projet “Mars Science Laboratory” succédant au projet Rover, envoi de Curiosity fin 2011.



Figure 1.4 : Robot Hilare [4]



Figure 1.5 : Robot Shakey [4]



Figure 1.6 : Robot Spirit [4]



Figure 1.7 : Robot Curiosity [4]

#### 4. Constituants mécaniques des robots

Les robots sont composés de différentes pièces mécaniques, électroniques et électromécaniques, la Figure (1.8) représente les vocabulaires du robot :

- Actionneur = moteur
- Axe = articulation
- Corps = segment
- Organe terminal
- Effecteur = outil
- Base

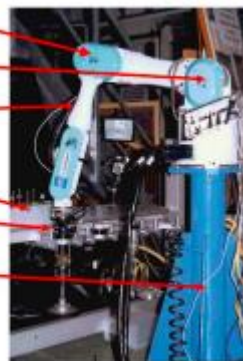


Figure 1.8 : Les vocabulaires du robot [3]

La structure mécanique articulée d'un robot comprend trois ensembles principaux

**4.1. Base** : Le support sur lequel repose l'origine du premier élément de la structure articulée formant le bras [3].

**4.2. Le porteur :** Représente l'essentiel du système mécanique articulé, il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tâche à réaliser. La situation d'un corps peut être définie comme la position et l'orientation d'un repère attaché à ce corps par rapport à un repère de référence. Cette combinaison de trois degrés de liberté (une rotation et/ou translation) nécessite une classification des robots qui se base sur différentes configurations [5].

**4.3. Organe terminal (effecteur) :** Il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant différentes fonctionnalités. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Enfin un robot peut être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixe à l'extrémité mobile de la structure mécanique [5].

### 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 1.9).

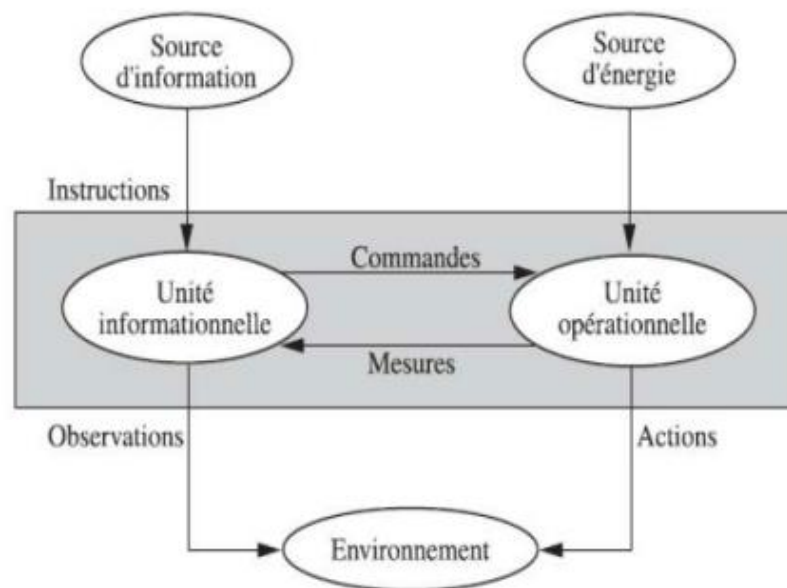


Figure 1.9 : Structure fonctionnelle d'un robot [1]

#### 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 [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 chaînes 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 [1]

## 6. Caractéristiques d'un robot

Le choix d'un robot devrait être déterminé en fonction de l'usage prévu. Voici quelques paramètres à considérer, le cas échéant :

- Espace (ou volume) de travail : Il s'agit du volume accessible par l'outil du robot, lequel dépend essentiellement de la géométrie du robot et de la longueur de ses segments.
- Positionnement absolu imprécis : Cette dépendance est liée à la souplesse du robot et des erreurs des modèles géométriques.
- Répétabilité : C'est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail.
- Vitesse maximale de translation ou de rotation de chaque axe.
- Accélération maximale de chaque axe.
- Charge utile : Il s'agit de la charge maximale que le robot peut supporter sans compromettre la répétabilité et les performances dynamiques.

La figure (1.10) illustre une fiche technique d'un robot, mettant en évidence ses principales caractéristiques [3] :

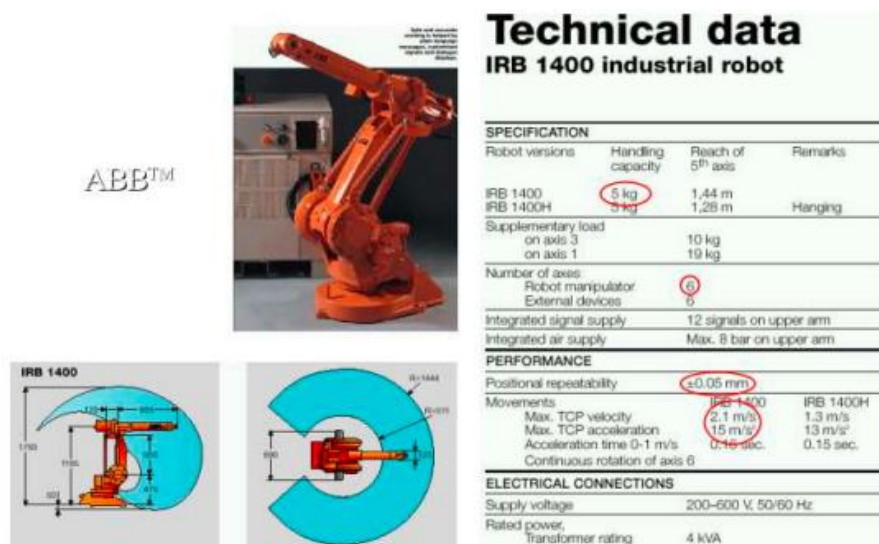


Figure 1.10 : Fiche technique d'un robot industriel [3]

## 7. Les différents types des robots

### 7.1. Les robots cartésiens

- Caractéristiques :
  - 3 axes  $\perp$  2 à 2, série, PPP, 3 DDL.
  - Très bonne précision.
  - Lent.

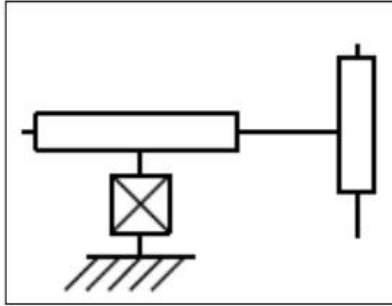


Figure 1.11 : Robot Toshiba [4]

## 7.2 Les robots parallèles

- Caractéristiques :
  - Plusieurs chaînes cinématiques en parallèle.
  - Espace de travail réduit.
  - Précis (grande rigidité de la structure).
  - Rapide.



Figure 1.12 : Robot Comau [4]

## 7.3. Les robots cylindriques

- Caractéristiques :
  - 3 axes, série, RPP, 3 DDL.
  - Espace de travail cylindrique.
  - Très rapide.

## 7.4. Les robots sphériques

- Caractéristiques :
  - 3 axes, série, RRT, 3 DDL.
  - Espace de travail sphérique.
  - Grande charge utile.

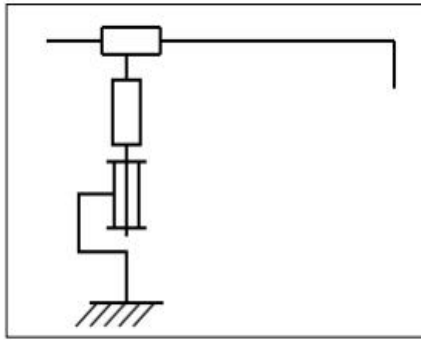


Figure 1.13 : Robot Seiko [4]

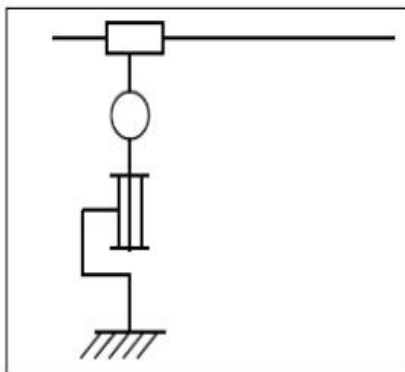


Figure 1.14 : Robot Fanuc [4]

### 7.5. Le robot SCARA

SCARA= Slective Complaint Articulated Robot for Assembly

Robot pour assemblage

Caractéristiques :

- 3 axes, série, RRP, 3 DDL.
- Espace de travail cylindrique.
- Précis.
- Très rapide.

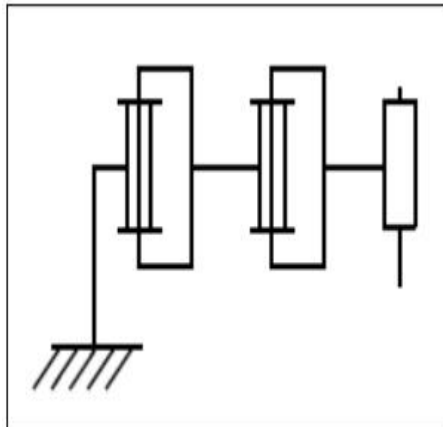


Figure 1.15 : Robots SCARA [4]

## 8. Classification des robots

Il est possible de classer les robots soit d'un point de vue fonctionnel, soit en fonction de leur structure géométrique.

### 8.1. Classification fonctionnelle

Le nombre de classes et les distinctions entre elles varient d'un pays à l'autre. Par exemple, au Japon, il y a 6 classes, tandis qu'en France, il y en a 4. L'A. F. R. I identifie 4 classes spécifiques, qui sont illustrées [6]:

#### 8.1.1. Manipulateurs à commande manuelle ou télécommande

La figure (1.16) représente les manipulateurs à commande manuelle.

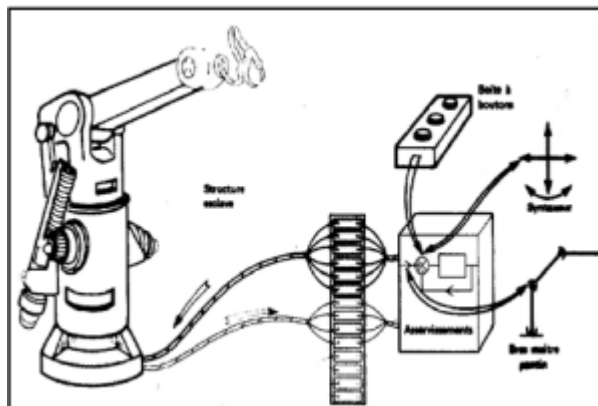


Figure 1.16 : Manipulateur à commande manuelle [6]

#### 8.1.2. Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés

La commande peut être effectuée soit mécaniquement par cames et butées, comme illustré dans la figure (1.17), soit par automate programmable. Il est possible de faire une distinction entre les manipulateurs à cycle fixe et les manipulateurs à cycle programmable.

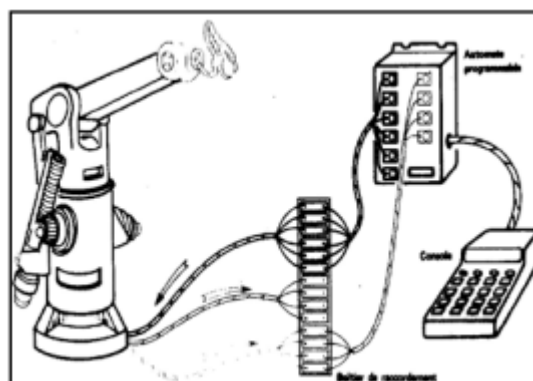


Figure 1.17 : Manipulateur à cycle pré-réglé [6]

#### 8.1.3. Robots programmables

Il s'agit de la première génération de robots industriels qui reproduisent des mouvements programmés sans avoir d'informations sur leur environnement. On distingue les robots "play-back" reproduisant une tâche apprise des robots à commande numérique programmables hors ligne. L'apprentissage de la tâche se fait souvent à l'aide d'un "syntaxeur", permettant à un

opérateur de guider le robot vers des points mémorisés. Certains robots suivent des trajectoires complexes, comme les robots de peinture, guidés par un opérateur humain. La Figure (1.18) représente ces robots programmables.

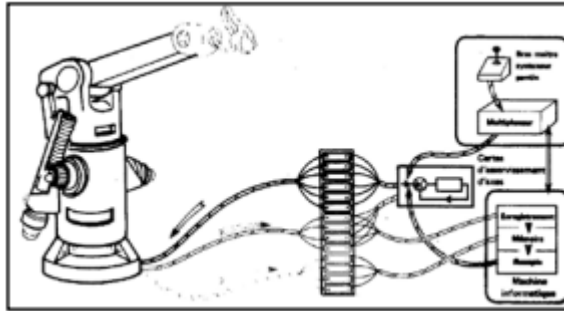


Figure 1.18 : Robot programmable [6]

#### 8.1.4. Robots intelligents

Actuellement, on observe l'émergence de robots de deuxième génération capables d'acquieser et d'utiliser des informations sur leur environnement, telles que des systèmes de vision, des détecteurs de proximité et des capteurs d'efforts, illustrés dans la figure (1.19). Les recherches se portent également sur des robots de troisième génération qui peuvent comprendre un langage oral proche du langage naturel et naviguer de manière autonome dans un environnement complexe, grâce à l'intégration de l'intelligence artificielle.

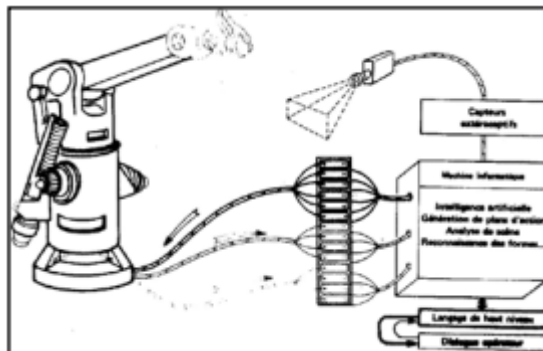


Figure 1.19 : Robot intelligent [6]

### 8.2. Classification géométrique

Les robots peuvent également être classés en fonction de leur configuration géométrique, c'est-à-dire l'architecture de leur porteur [1].

#### 8.2.1 Structure cartésienne (PPP)

Historiquement, la configuration à trois liaisons prismatiques trouve ses origines de manière logique dans la conception traditionnelle des machines-outils à trois axes, telles que les rectifieuses ou les fraiseuses. Bien que cette structure soit relativement peu courante, elle est employée dans certaines applications spécifiques, notamment les robots pratiques et les robots de magasinage



Figure 1.20 : Structure d'un robot cartésien [1]

### 8.2.2. La structure cylindrique (RPP) ou (PRP)

Combinant une rotation avec deux translations, cette configuration présente l'inconvénient d'avoir un volume de travail limité par rapport à un encombrement total significatif. Pratiquement obsolète, elle est rarement utilisée de nos jours.

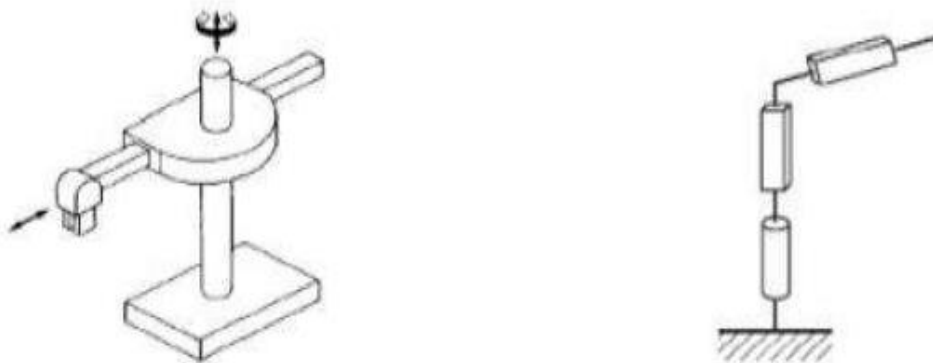


Figure 1.21 : Structure d'un robot cylindrique [1]

### 8.2.3. La structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale

Cette structure est presque obsolète en raison de motifs similaires à ceux ayant conduit à l'abandon de la structure cylindrique.

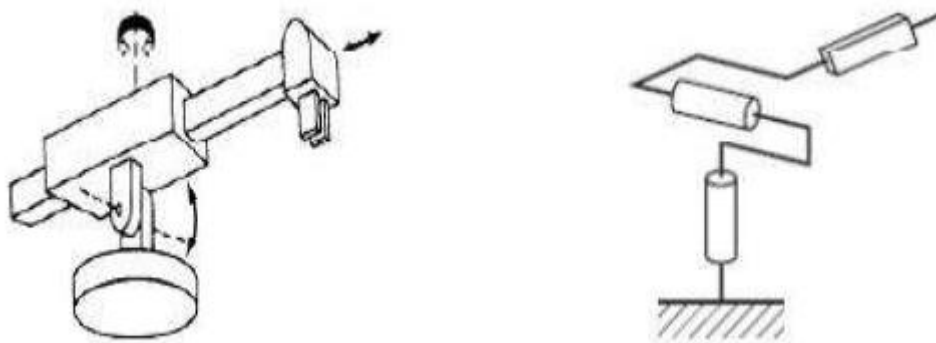


Figure 1.22 : Structure d'un robot sphérique [1]

### 8.2.4. La structure 3R (anthropomorphe)

Facilite le positionnement d'un objet dans l'espace en utilisant trois rotations, habituellement une autour d'un axe vertical et deux autour d'axes horizontaux parallèles. Pouvant être programmée aisément pour divers types de tâches et offrant un volume de travail substantiel.

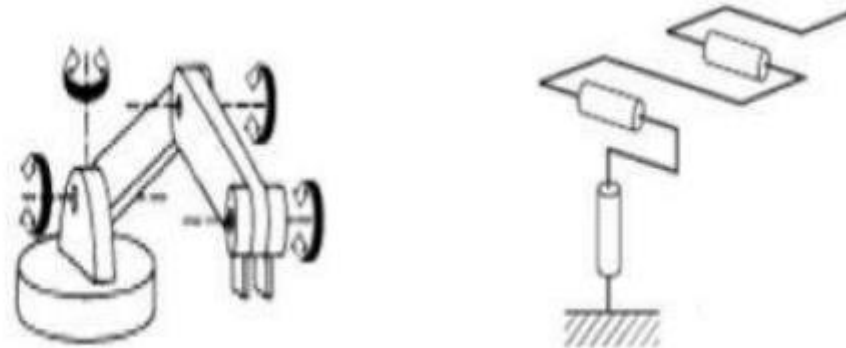


Figure 1.23 : Structure d'un robot 3R [1]

### 8.2.5. La structure dite SCARA

La configuration à deux axes de rotation parallèles est largement adoptée, notamment pour des tâches courantes de manutention et d'assemblage dans l'industrie. Ce succès commercial s'explique par le ratio avantageux entre le volume de travail et l'encombrement, ainsi que par l'adaptabilité de la structure SCARA à ce type de tâches.



Figure 1.24 : Structure d'un robot SCARA [1]

## 9. Domaine d'application des robots

La robotique englobe divers secteurs d'application, notamment son intégration dans l'industrie pour accomplir les tâches suivantes :

- Automatisation des processus de fabrication et de production.
- Exécution de tâches répétitives.
- Maintien d'une qualité constante grâce à la répétitivité des standards de qualité.
- Fabrication de lots de taille moyenne (30-200 unités).
- Adaptation aux volumes de production.
- Optimisation de l'utilisation des capacités de production sans nécessité de pauses.



- Travail pénible et dangereux.
- L'exploration des places difficiles d'accès (milieu sous-marin, espace...) ainsi que dans les environnements hostiles (radioactivité, etc.).
- Robots de service aux humains et d'équipements [7].

## 9.1. Robots industriels

Un robot fonctionnant de manière automatique ou semi-automatique pour effectuer diverses opérations de fabrication, telles que le soudage, la peinture, l'assemblage, l'emballage, la palettisation, ainsi que dans les secteurs de l'industrie alimentaire et biologique [7].

### 9.1.1. Robots industriels de soudage

Le soudage est l'une des utilisations fréquentes de la robotique industrielle. L'automatisation du soudage des châssis de voiture renforce la sécurité, car les robots n'omettent jamais un point de soudure et effectuent chaque opération de manière constante tout au long de la journée. Environ 25 % des robots industriels sont déployés dans diverses tâches de soudure [7].

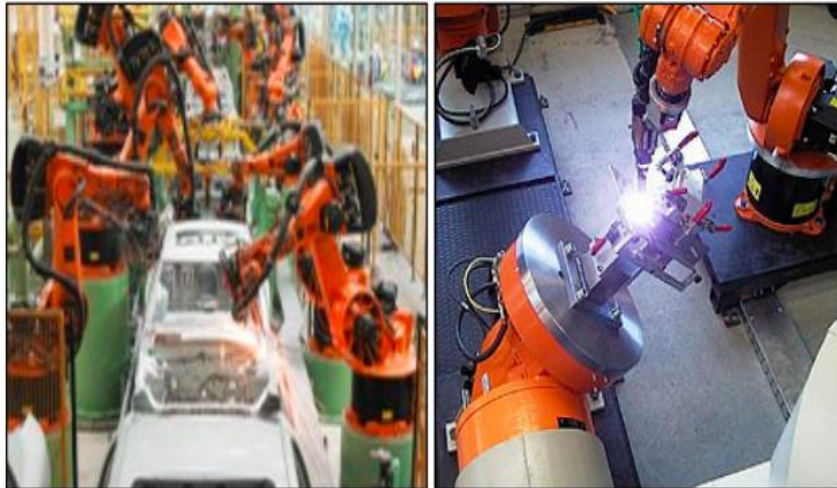


Figure 1.25 : Robots industriels de soudage [7]

### 9.1.2 Robots industriels d'assemblage

Les progrès récents dans la robotisation et l'automatisation permettent aux robots d'accomplir des tâches complexes d'assemblage. Ils intègrent des interfaces standards avec des systèmes de vision 2D et 3D pour la détection et le guidage, permettant l'identification des pièces à assembler et assurant une précision dans le processus d'assemblage [8]. L'assemblage représente environ 33% des utilisations des robots industriels selon les données de 1997. Un grand nombre de ces robots sont utilisés dans l'industrie automobile et électronique [7].

### 9.1.3. Robots industriels d'emballage / palettisation

L'utilisation de robots industriels dans l'emballage et la palettisation était considérée comme mineure, représentant seulement 2,8% du parc en 1997. Cependant, les prévisions indiquent une croissance significative de ces applications, car la manipulation des robots devient de plus en plus accessible [7].





Figure 1.26 : Robots Industriels d'Assemblage [7]



Figure 1.27 : Robots Industriels d'Emballage / Palettisation [7]

## 9.2. L'Industrie agro-alimentaire

L'agroalimentaire est un secteur industriel qui demande un rythme de production effréné. Dans ce contexte, la robotique collaborative peut intervenir pour soulager l'humain, et le compléter dans des opérations de travail répétitif qui demande peu de technicité [9].

## 9.3. Robots dans les biotechnologies

Le robot pharmaceutique se présente comme un partenaire essentiel pour la production industrielle. Ces robots de laboratoire sont idéalement adaptés aux besoins des industries pharmaceutiques, chimiques et médicales.

### 9.3.1. Robots chirurgicaux

La chirurgie robotique a été développée pour tenter de surmonter les limites des procédures chirurgicales mini-invasives préexistantes et pour améliorer les capacités des chirurgiens pratiquant la chirurgie ouverte.

Exemple : Le robot da Vinci est considéré comme l'un des robots chirurgicaux les plus performants. [10]



Figure 1.28 : Robot agro-alimentaire [9]



Figure 1.29 : Robot chirurgical [10]

#### 9.4. Robots d'exploration

On en distingue deux types :

##### 9.4.1. Robots d'exploration spatiale

Un robot qui opère de manière automatique ou semi-automatique pour remplir des missions d'exploration dans des endroits inaccessibles ou dangereux pour l'être humain [7].

##### 9.4.2. Robots d'exploration des mers et océans

Les robots d'exploration des mers sont capables de travailler, jusqu'à 2000 m sous la surface [7].



Figure 1.30 : Robots d'exploration spatiale [7]

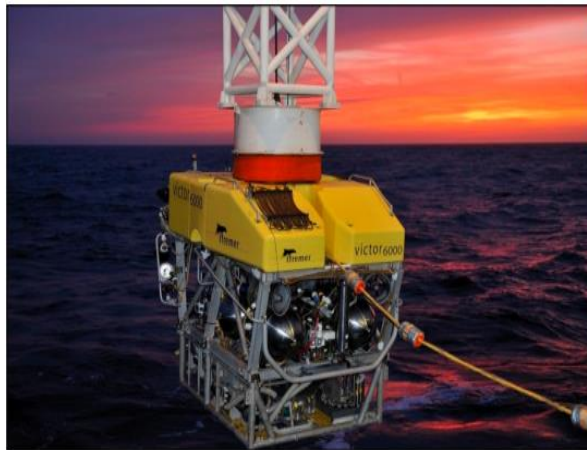


Figure 1.31 : Robots d'exploration des mers [7]

## 9.5. Robots de service

Un robot est conçu pour accomplir de manière automatique ou semi-automatique des missions de service envers les êtres humains et les équipements, à l'exception des tâches liées à la fabrication [7].

### 9.5.1. Robots de service aux humains

Colossus a été conçu par Shark Robotics, une entreprise de La Rochelle, pour apporter un soutien technique aux pompiers dans les zones à risque. [11]

### 9.5.2 Robots de service aux équipements

Skywash de Putzmeister Werke, en Allemagne, réduit de moitié le temps de lavage d'un avion grâce à un système robotique avancé. Il intègre la préprogrammation des mouvements basée sur un modèle CAO, la localisation automatique des objets par des capteurs, un asservissement du mouvement avec des capteurs tactiles, une architecture redondante sur une base mobile, et assure une sécurité maximale tout en étant supervisé par un être humain [7].



Figure 1.32 : Robots de Service aux Humains [11]



Figure 1.33 : Robot de service aux équipements [7]

### 9.6. Robot de loisirs

Ce sont des robots de loisirs pour les enfants [7].



Figure 1.34 : Robot de loisirs [7]

### 10. L'avenir de la robotique et des systèmes automatisés

Le marché mondial de la robotique industrielle connaît une croissance remarquable, passant d'une valeur estimée entre 35 et 37 milliards de dollars en 2016 à une fourchette estimée entre 70 et 93 milliards de dollars en 2023. Cette tendance positive devrait se poursuivre, avec des projections pouvant atteindre jusqu'à 147 milliards de dollars d'ici 2025. Ce phénomène de développement impacte divers secteurs tels que la construction, le domaine militaire, la santé, l'agriculture, la distribution et le commerce électronique [12].

**11. Conclusion du chapitre**

Dans le présent chapitre, nous avons exploré la définition générale des robots, leurs diverses catégories, caractéristiques, ainsi que les domaines d'application qui leur sont associés. Ces robots industriels jouent un rôle significatif dans le secteur industriel, contribuant à économiser du temps, de la main-d'œuvre et améliorant la précision, entre autres avantages.

## Chapitre 2

### Modélisation des robots

#### 1. Introduction

Pour concevoir et contrôler des robots, il est nécessaire de calculer certains modèles mathématiques. Ces modèles sont établis selon les objectifs visés, les contraintes des tâches à réaliser et les performances recherchées. On distingue trois types : modèle géométrique, modèle cinématique et modèle dynamique.

Obtenir ces différents modèles est une tâche ardue, dont la difficulté varie en fonction de la complexité de la chaîne cinématique et du nombre de degrés de liberté du système. On présente dans ce chapitre quelques méthodes permettant d'établir ces modèles.

#### 2. Modélisation géométrique

##### 2.1. Description géométrique

En général, un robot est constitué de multiples bras ou éléments rigides interconnectés par des articulations considérées comme idéales, (c'est-à-dire sans jeu mécanique ni déformation), et équipés d'un effecteur final. Assurer la qualité de l'exécution de la tâche nécessite une maîtrise précise de la position de cet effecteur final. Il est donc crucial de développer un modèle géométrique cohérent avec le comportement géométrique de la structure du robot.

Dans la littérature scientifique, le modèle géométrique est souvent défini à l'aide d'une séquence de transformations homogènes partant de la base du robot jusqu'à l'effecteur final [13].

Le Modèle Géométrique Direct permet de connaître les mouvements de l'effecteur dans l'espace de la tâche en fonction des mouvements des articulations du robot. Il permet notamment de déterminer l'espace de travail du robot (domaine atteignable).

Le MGD d'un robot est donc l'application  $f$  exprimant  $X$  en fonction de  $q$  :

$$X = f(q) = \begin{bmatrix} \text{position de l'effecteur dans } R_0 \\ \text{orientation de } R_n \text{ par rapport à } R_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} / R_0 \quad (2.1)$$

Donc il s'agit d'un système de six équations permettant de calculer les six inconnus  $X_j$  en fonction de  $n$  valeurs de  $q_j$ .

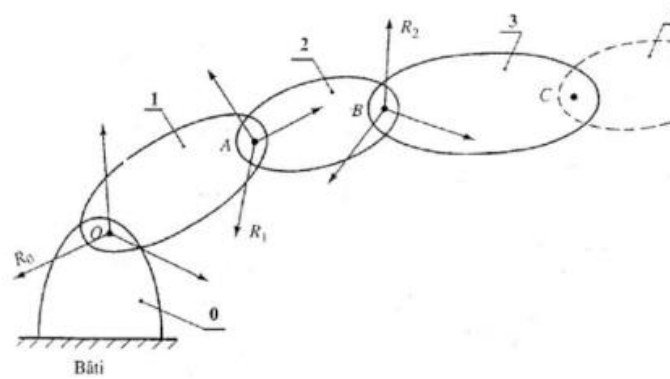
##### 2.2. Méthode de Denavit-Hartenberg

Dans les années 1950s, Jacques Denavit et Richard Hartenberg ont eu l'excellente idée de proposer une méthode simple et systématique pour placer des référentiels sur chaque lien d'un mécanisme sériel qui facilite énormément le calcul des matrices de transformation homogène [14]. La méthode Denavit-Hartenberg permet de décrire la transformation homogène entre deux solides adjacents présentant une configuration spécifique de repères pour la position et

l'orientation. Cette méthode permet donc, sous certaines conditions, de calculer quatre inconnus au lieu de six.

Considérons un robot série de chaîne cinématique ouverte (Figure 2.1), pour la construction des repères il faut suivre la procédure suivante :

- Nommer les corps du robot de  $j=0$  jusqu'à  $j=n$  en commençant par la base du robot avec  $j=0$  ;
- Nommer les articulations de  $j=1$  à  $n$  (1 pour le premier degré de liberté et  $n$  pour le dernier) -
- Pour  $j=0$  jusqu'à  $j=n-1$  fixer l'axe  $Z_j$  sur l'articulation  $j+1$  ;
- L'origine du repère  $R_0$  sera un point quelconque de l'axe  $Z_0$ , de sorte que,  $X_0$  et  $Y_0$  forment un repère orthonormé direct ;
- Pour  $j=1,2,\dots,n-1$ , l'origine du repère est fixée à l'intersection de l'axe  $Z_j$  avec la droite perpendiculaire commune à  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$ . Si les deux axes se coupent, l'origine est le point d'intersection. Si par contre les axes sont parallèles l'origine est l'origine du repère de l'articulation  $j+1$ .
- L'axe  $X_j$  est la droite perpendiculaire commune à  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$ , et l'axe  $Y_j$  est choisi de sorte que le repère soit orthonormé direct [13].



**Figure 2.1 : Robot série à chaîne cinématique ouverte [3]**

Le passage du repère  $R_{i-1}$  au repère  $R_i$  s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivant [14] comme montré sur la figure (2.2). Ces paramètres sont nommés paramètres de Denavit-Hartenberg ou paramètres D-H :

- $\alpha_j$  : angle entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  correspondant à une rotation autour de  $X_j$  ;
- $d_j$  : Distance entre  $X_{j-1}$  et  $X_j$  le long de  $Z_j$  ;
- $\theta_j$  : Angle entre les axes  $X_{j-1}$  et  $X_j$  correspondant à une rotation autour de  $Z_j$  ;
- $a_j$  : Distance entre  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  le long de  $X_j$ .



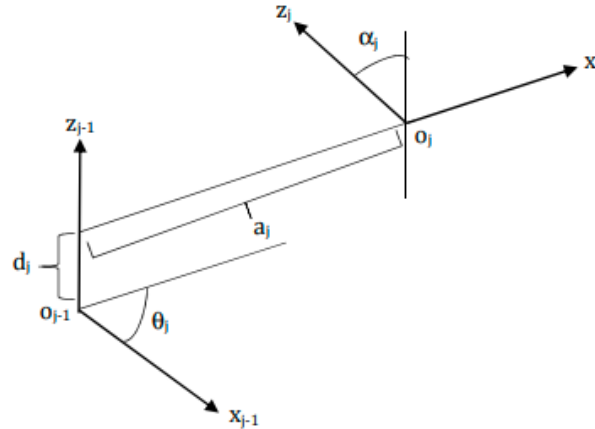


Figure 2.2 : Notation de Denavit-Hartenberg [3]

La variable articulaire  $q_j$  est soit  $\theta_j$ , soit  $a_j$ , selon que l'articulation  $j$  est rotoïde ou prismatique. En utilisant ces paramètres, la matrice de transformation homogène  ${}^{j-1}T_j$  s'écrit [14] :

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(Z_{j-1}, \theta_j) \times \text{Trans}(Z_{j-1}, d_j) \times \text{Trans}(X_j, a_j) \times \text{Rot}(X_j, \alpha_j) \quad (2.2)$$

Connaissant les matrices de rotation et de translation, les matrices de transformation s'écrivent [13] :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & 0 \\ s\theta_j & c\theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_j & -s\alpha_j & 0 \\ 0 & s\alpha_j & c\alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Finalement, nous obtenons la matrice de transformation du repère  $j-1$  au repère  $j$  :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} c\theta_j & -c\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j s\theta_j & a_j c\theta_j \\ s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & -s\alpha_j c\theta_j & a_j s\theta_j \\ 0 & s\alpha_j & c\alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### 2.3. Méthode de Khalil et Kleinfinger

Le modèle de D-H est le plus répandu dans la communauté scientifique pour la modélisation des robots. Mais cette méthode, développée pour des structures ouvertes simples, présente des ambiguïtés lorsqu'elle est appliquée sur des robots ayant des structures fermées ou arborescentes. C'est pourquoi, nous préconisons la notation de Khalil et Kleinfinger qui permet la description homogène, et avec un nombre minimum de paramètres, des architectures ouvertes simples et complexes de systèmes mécaniques articulés [15].

Les règles de cette méthode sont comme suit :

- L'axe  $Z_j$  correspond à l'axe de l'articulation  $j$  ;
- L'axe  $X_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $Z_j$  et  $Z_{j-1}$

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



- $\alpha_j$  : angle entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  correspondant à une rotation autour de  $X_{j-1}$  ;
- $d_j$  : distance entre  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  le long de  $X_{j-1}$  ;
- $\theta_j$  : angle entre les axes  $X_{j-1}$  et  $X_j$  correspondant à une rotation autour de  $Z_j$  ;
- $r_j$  : distance entre  $X_{j-1}$  et  $X_j$  le long de  $Z_j$ .

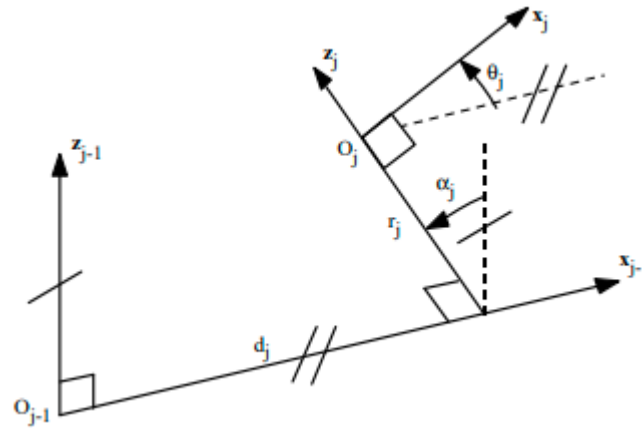


Figure 2.3 : Notation de Khalil et Kleinfinger [15]

La matrice de transformation de repère  $j$  relative au repère  $j-1$  est finalement donnée par :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & d_j \\ c\alpha_j s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & -s\alpha_j & -r_j s\alpha_j \\ s\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j c\theta_j & c\alpha_j & r_j c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

• **Remarques**

- Pour la définition du repère de référence  $R_0$ , le choix le plus simple consiste à prendre  $R_0$  confondu avec le repère  $R_1$  quand  $q_1 = 0$ , ce qui signifie que  $Z_0$  est confondu avec  $Z_1$  et  $O_0 = O_1$  lorsque l'articulation 1 est rotoïde, et  $Z_0$  est confondu avec  $Z_1$  et  $X_0$  est parallèle à  $X_1$  lorsque l'articulation 1 est prismatique. Ce choix rend les paramètres  $\alpha_1$  et  $d_1$  nuls [15].
- Pour une mise en œuvre pratique de la méthode (D-H), il faut tout d'abord placer les repères sur les articulations du robot tout en remplissant un tableau avec les paramètres (D-H), couramment appelée matrice (D-H). Le paramètre  $\sigma_j$  tient compte du type de l'articulation, il est égal à 0 si l'articulation  $j$  est rotoïde, et 1 si elle est prismatique [4].

**2.4. Représentation des coordonnées opérationnelles**

Pour définir la situation de l'organe terminal du robot dans l'espace, il faut préciser sa position et son orientation, où [16] :

$X_p$  : représente les trois coordonnées opérationnelles de position ;

$X_r$  : représente les coordonnées opérationnelles d'orientation.

Pour les coordonnées  $X_p$  tout le monde s'accorde pour choisir les composantes cartésiennes, mais pour spécifier une rotation, la matrice  ${}^F R_E$  présente un nombre surabondant de paramètres (neuf), tandis que, seul trois paramètres indépendants sont suffisants pour une telle représentation. Plusieurs choix sont possibles et adoptés en pratique pour les coordonnées  $X_r$  :

- Angles de Cardans (Roulis - Tangage - Lacet) ;
- Quaternions d'Euler,

- Angles d'Euler.

### 2.5. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de transformation  ${}^0T_n$  [14].

$$T_n^0 = T_1^0(q_1)T_2^1(q_2) \dots \dots T_n^{n-1}(q_n) \quad (2.6)$$

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

$$X = f(q) \quad (2.7)$$

q : Étant le vecteur des variables articulaires tel que :

$$q = [q_1 q_2 \dots q_n]^T \quad (2.8)$$

Les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$X = [X_1 X_2 \dots X_n]^T \quad (2.9)$$

### 2.6. Modèle 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 [1] :

$$q = f^{-1}(X) \quad (2.10)$$

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

#### 2.6.1. La méthode géométrique

Elle permet de déterminer le vecteur q par utilisation des transformations géométriques en prenant avantage de la structure particulière du manipulateur considéré. Elle consiste à utiliser les relations trigonométriques d'un triangle quelconque. [1]

Considérons le manipulateur se déplaçant dans le plan tel que décrit dans la figure (2.4). Le MGD de ce robot est décrit par le système d'équations :

$$\begin{cases} x = q_2 \cos q_1 & (1) \\ y = q_2 \sin q_1 & (2) \end{cases} \quad (2.11)$$

Une démarche analytique simple permet de déterminer le MGI, soit en divisant (2)/(1) on obtient :

$$\frac{y}{x} = \operatorname{tg}(q_1) \rightarrow q_1 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left( \frac{y}{x} \right) \quad (2.12)$$

On a également la relation trigonométrique :

$$x^2 + y^2 = q_2^2 \rightarrow q_2 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.13)$$

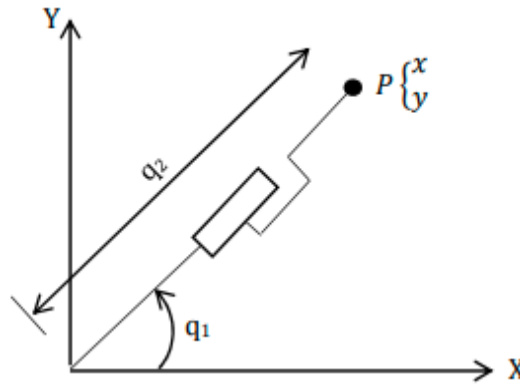


Figure 2.4 : Manipulateur à 2 ddl évoluant dans le plan [3]

### 2.6.2. La méthode de Paul

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

$$U_0 = {}^0T_n = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times \dots \times {}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \quad (2.15)$$

Pour résoudre cette équation, Paul a suggéré une approche consistant à multiplier de manière successive les deux côtés de l'équation par les matrices  ${}^jT_{j-1}$ , pour  $j$  variant de 1 à  $n-1$ . Cette série d'opérations permet d'isoler et d'identifier progressivement les variables articulaires recherchées [16].

La succession des équations permettant le calcul de tous les  $q_j$  est pour un robot de six degrés de liberté la suivante :

$$\begin{aligned} U_0 &= {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \\ {}^1T_0 \times U_0 &= U_1 = {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \\ {}^2T_1 \times U_1 &= U_2 = {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \\ {}^3T_2 \times U_2 &= U_3 = {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \\ {}^4T_3 \times U_3 &= U_4 = {}^4T_5 \times {}^5T_6 \\ {}^5T_4 \times U_4 &= U_5 = {}^5T_6 \end{aligned} \quad (2.16)$$

## 3. Modélisation cinématique

La modélisation cinématique permet de représenter la relation entre la vitesse de l'organe terminal et les vitesses articulaires, ainsi que leur inverse.

### 3.1. Modèle cinématique direct

Le Modèle Cinématique Direct (MCD) permet de calculer les composantes du torseur cinématique  $\dot{X}$  à partir des vitesses articulaires dites généralisées  $\dot{q}$ , dérivées par rapport au temps des coordonnées généralisées  $q$ . Le torseur cinématique est défini par [16] :

$$\dot{X} = f(\dot{q}, q) \quad (2.17)$$

Le MCD fait intervenir la matrice Jacobienne, fonction de la configuration du robot, manipulateur. Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q) \cdot \dot{q} \quad (2.18)$$

Où :  $J(q) \in \mathbf{R}^{m \times n}$  Est la matrice jacobéenne.

L'intérêt de la matrice jacobienne est multiple :

- Elle est à la base du modèle différentiel inverse, permettant de calculer une solution locale des variables articulaires  $q_j$  connaissant les coordonnées opérationnelles  $X_j$  ;
- En statique, on utilise le jacobien pour établir la relation liant les efforts exercés par l'organe terminal sur l'environnement aux forces et couples des actionneurs ;
- Elle facilite le calcul des singularités et de la dimension de l'espace opérationnel accessible du robot.

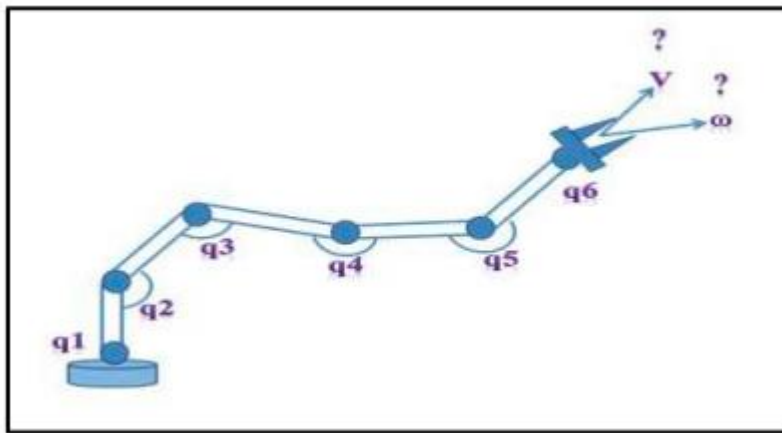


Figure 2.5 : Modèle cinématique direct [16]

### 3.2. Calcul la matrice Jacobienne analytique

Le calcul indirect de la matrice jacobienne analytique consiste à utiliser le modèle géométrique du robot manipulateur.

$$X = f(q) \quad (2.19)$$

Et par définition, la matrice jacobienne analytique est la matrice des dérivées partielles de la fonction  $f$  par rapport aux coordonnées généralisées, ainsi :

$$J = \frac{\partial X}{\partial q} \quad (2.20)$$

Cette méthode de dérivation est facile à mettre en œuvre pour des robots à deux ou trois degrés de liberté dans le plan, mais pour des robots ayant plus de trois degrés de liberté la dérivation manuelle devient difficile.

Prenons l'exemple du robot plan de la figure (2.4), rappelons que son MGD est donné par :

$$\begin{cases} x = q_2 \cos q_1 = f_1(q_1, q_2) & (1) \\ y = q_2 \sin q_1 = f_2(q_1, q_2) & (2) \end{cases} \quad (2.21)$$

La matrice Jacobienne est donc donnée par :

$$J = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -q_2 \sin q_1 & \cos q_1 \\ q_2 \cos q_1 & \sin q_1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

### 3.3. Calcul la matrice Jacobienne cinématique

Le mouvement de l'organe terminal peut également être défini par sa vitesse instantanée et sa vitesse de rotation instantanée sous la forme d'un torseur cinématique [17].

#### 3.3.1. Mise en œuvre pratique de la matrice Jacobienne cinématique

Pour un robot fonctionnant en trois dimensions, la matrice Jacobienne transforme les vitesses articulaires en vitesses effectrices finales en utilisant l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}_{6 \times n} = J_{6 \times n} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (2.23)$$

J est la matrice jacobienne. Il s'agit d'une matrice de m lignes et n colonnes, n représente le nombre d'articulations. La matrice de gauche représente les vitesses de l'effecteur final.  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  et  $\dot{z}$ . Avec les points en haut représentent les vitesses linéaires (c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'effecteur final se déplace dans les directions x, y et z par rapport à la base du robot).  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  et  $\omega_z$  représentent les vitesses angulaires (c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'effecteur final tourne autour des axes x, y et z de la base du robot).

Donc la matrice Jacobienne peut être décomposée en une Jacobienne qui prend en compte les vitesses linéaires de l'effecteur et une Jacobienne qui prend en compte les vitesses angulaires comme suit :

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Pour remplir la matrice jacobienne, nous utilisons les tableaux suivants :

Pour une articulation rotoïdes :

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times (d_n^0 \times d_{i-1}^0) \\ R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Pour une articulation prismatique

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

La moitié supérieure de la matrice est utilisée pour déterminer les composantes linéaires de la vitesse, tandis que la partie inférieure est utilisée pour déterminer les composantes rotationnelles de la vitesse.

$R_{i-1}^0$  est la matrice de rotation, tandis que le vecteur  $d$  est la dernière colonne de la matrice de transformation homogène (vecteur position).

### 3.4. Utilisation de la matrice jacobienne

La matrice jacobienne  $J_n$  a une importance primordiale dans l'analyse et la commande du mouvement des robots. Elle intervient dans quasiment tous les aspects de la manipulation robotique, que ce soit dans la planification, l'identification des configurations singulières, la dérivation des équations dynamiques du mouvement, ou encore la conversion des forces et des couples de l'organe terminal aux articulations du manipulateur [16].

### 3.5. Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse permet de déterminer la vitesse des variables articulaires en fonction de la vitesse des variables opérationnelles. Pour les manipulateurs non redondants ( $n=m$ ), le modèle s'écrit :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (2.27)$$

La solution de l'équation (2.27) 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 [1].

## 4. Modélisation dynamique

La modélisation dynamique consiste à formuler les équations du mouvement du robot, permettant ainsi de lier les couples ou les forces générés par les actionneurs avec les positions, vitesses et accélérations des articulations [1].

### 4.1. Modélisation dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse représente les couples appliqués par les actionneurs en relation avec les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Les méthodes les plus couramment utilisées pour calculer ce modèle sont :

- Le formalisme de Lagrange ;
- Le formalisme de Newton-Euler.

### 4.2. 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 :

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - N(q, \dot{q}) - G(q) - \tau_f) \quad (2.28)$$

### 5. Conclusion du chapitre

Pour représenter un robot sériel avec  $n$  articulations, il est nécessaire de décrire son comportement à travers un modèle, ce processus étant appelé modélisation. En général, on cherche toujours le modèle le plus simple capable d'expliquer de manière satisfaisante le comportement du robot dans son domaine d'application, en particulier les modèles de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire. On distingue ainsi :

- Les modèles géométriques qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme ;
- Les modèles cinématiques permettent de contrôler la vitesse de déplacement du robot afin de connaître la durée d'exécution d'une tâche ;
- Les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Les informations fournies seront utilisées pour déterminer notre étude portant sur un type spécifique de robot appelé robot SCARA, lequel sera exploré en détail dans les chapitres à venir.



## Chapitre 3

# Modélisation géométrique et cinématique d'un robot SCARA

### 1. Introduction

La modélisation des robots exige la formulation de divers modèles mathématiques, incluant les modèles géométriques, cinématiques et dynamiques.

Dans ce chapitre, nous exposons quelques méthodes permettant de développer ces modèles, avec une focalisation particulière sur les robots de type SCARA.

### 2. Généralités sur les robots SCARA

#### 2.1. Une chronique de l'évolution du robot SCARA

En 1981, Sankyo Seiki, Pentel et NEC ont introduit le robot SCARA, un concept novateur pour les robots d'assemblage. Conçu sous la supervision du professeur Hiroshi Makino de l'Université de Yamanashi, ce robot présentait un bras rigide selon l'axe Z et flexible dans les axes X et Y, lui permettant de s'ajuster aux ouvertures dans ces axes [18].

#### 2.2. Définition

Son nom est un acronyme qui signifie Selective Compliance Articulated Robot Arm. Il est constitué de deux liaisons rotoïdes et d'une liaison prismatique, en faisant un robot de type RRP. Une dernière liaison rotoïdes peut être associée en bout de bras pour ajouter un degré de mobilité [18].

#### 2.3. La configuration

Grâce à la configuration des articulations parallèles du SCARA, le bras présente une certaine souplesse dans les axes X-Y tout en restant rigide dans l'axe Z, ce qui justifie l'utilisation du terme "conformité sélective". Le deuxième attribut du SCARA est la disposition des bras articulés à deux liaisons similaires aux bras humains, d'où le terme souvent utilisé, articulé. Cette caractéristique permet au bras de s'étendre dans des zones confinées.

La configuration SCARA est actuellement l'un des types de robots les plus couramment utilisés dans l'industrie. Grâce à leur conception et leur polyvalence, ils sont devenus des outils essentiels dans de multiples secteurs [18].

#### 2.4. Les composants

- **Bras** : Le bras du robot SCARA se compose de plusieurs sections articulées qui lui permettent de se déplacer dans différentes directions. Ces articulations sont contrôlées par des moteurs qui permettent un mouvement précis du bras.

- **Effecteur final** : L'effecteur final est l'outil ou le dispositif situé à l'extrémité du bras du robot. Il peut s'agir d'une pince, d'un outil de soudure ou d'un autre outil selon l'application. L'effecteur final est responsable de l'exécution de la tâche spécifique assignée au robot.

- **Système de capteurs** : Le robot SCARA est équipé de plusieurs capteurs qui lui permettent de détecter et de réagir à son environnement. Ces capteurs peuvent être des capteurs de proximité, des capteurs de force ou des capteurs de vision [19].



Figure 3.1 : Robot SCARA [18]

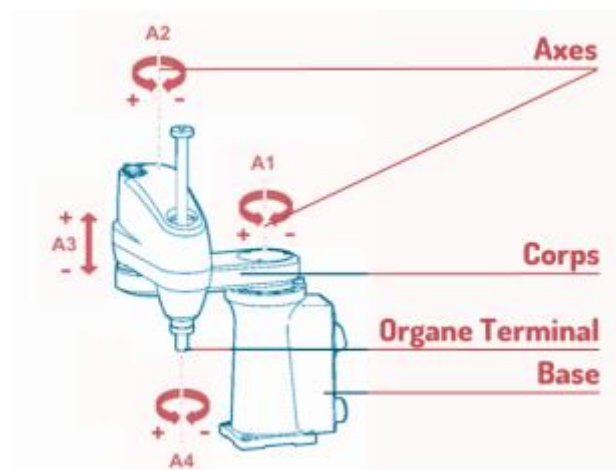


Figure 3.2 : Structure du robot SCARA [18]

## 2.5. Caractéristiques principales

- **Enveloppe de travail** : Les robots SCARA ont une enveloppe de travail de forme cylindrique avec des variations dans le diamètre et la profondeur du cylindre. Les longueurs totales des bras un et deux définissent le diamètre du cercle, tandis que la course Z définit la profondeur du cylindre. Dans la plupart des applications, l'enveloppe de travail d'un SCARA est contenue à l'avant et sur le côté. La zone arrière peut ne pas être utilisable.

- **Charge utile** : Dans la plupart des applications, les robots effectuent des opérations à l'aide d'un outil à l'extrémité du robot, donc le poids et l'inertie de l'outil avec la pièce déterminent la charge utile maximale et les inerties qui doivent être conformes aux spécifications de fonctionnement du robot.

La plupart des fabricants de robots proposent au moins deux versions de SCARA afin de répondre aux diverses charges utiles et inerties. Il est crucial de prendre en considération la

charge utile. Par exemple : si un petit robot peut faire le travail, il n'est pas nécessaire d'utiliser de l'espace au sol avec un modèle plus grand.

- **Vitesse** : La vitesse est un facteur important dans le choix d'un robot, les SCARA sont typiquement l'un des plus rapides sur le marché.

- **Répétabilité** : Les robots SCARA ont généralement les meilleures performances en termes de répétabilité par rapport à tous les types de robots. Une excellente répétabilité est cruciale dans les petites applications d'assemblage où les tolérances doivent être de l'ordre de quelques microns [20].

La figure (3.3) illustre des caractéristiques du robot type SCARA.



**Figure 3.3 : Caractéristiques principales d'un robot SCARA (Fanuc) [20]**

## 2.6. Les différentes tâches du robot SCARA

Les robots SCARA sont extrêmement polyvalents et peuvent être employés pour une multitude de tâches. Cependant, il existe certaines applications où les SCARA se démarquent particulièrement. Voici cinq domaines dans lesquels ils excellent [21] :

- **L'assemblage** : C'est la tâche pour laquelle le SCARA a été conçu. Les tâches d'assemblage à grande vitesse, telles que celles de l'industrie électronique, sont très courantes pour les robots SCARA. Leur conformité sélective signifie qu'ils peuvent effectuer des insertions plus facilement que d'autres types de robots

- **Pick and place** : Les robots SCARA sont fréquemment les plus rapides et les plus économiques pour les opérations de Pick and Place à haute vitesse. Bien que leur vitesse soit surpassée uniquement par celle des robots Delta, ils sont généralement plus simples à installer car ils n'exigent pas un montage au-dessus de la zone de travail.

- **Gravure au laser** : Grâce à leur haute précision, les SCARA sont également très bien adaptés aux tâches de gravure et de dessin au laser. Ces dernières années, plusieurs effecteurs sont disponibles sur le marché, permettant d'ajouter des capacités de gravure laser à presque n'importe quel petit robot.

- **La soudure** : Les SCARA sont très populaires dans l'industrie électronique car ils peuvent être utilisés pour de nombreuses tâches de fabrication de base. L'une de ces tâches est la soudure. Avec un effecteur adapté, ils offrent une qualité de soudure très régulière et améliorer l'efficacité par rapport à la soudure à la main.

- **L'impression 3D** : Une autre application émergente dans le domaine de la robotique est l'impression 3D. Nous avons déjà observé de nombreuses situations où les robots à 6 axes permettent de réaliser des impressions 3D d'objets de taille plus importante. Les robots SCARA sont particulièrement adaptés à cette nouvelle application à l'échelle plus petite de la gamme.

## 2.7. Les Avantages et les inconvénients des robots SCARA

### - Avantages

- Bon compromis entre enveloppe de travail et occupation au sol ;
- Déplacements rapides ;
- Parmi les meilleures performances en répétabilité ;
- Architecture simple et peu coûteuse.

### Inconvénients

- Cinématique inverse complexe ;
- Limité à de faibles charges utiles ;
- Mobilité limitée (généralement 4 degrés de liberté).

## 3. Description du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx

Pour la réalisation de notre travail, nous avons pris un manipulateur de type **RRPR** à quatre degrés de liberté (Deux liaisons rotoïdes, une liaison prismatique et une liaison rotoïde supplémentaire dans l'organe terminal). Notre robot est constitué d'un ensemble de corps reliés par des articulations, ces dernières étant actionnées par des moteurs, telles que représentées par la figure (3.4).

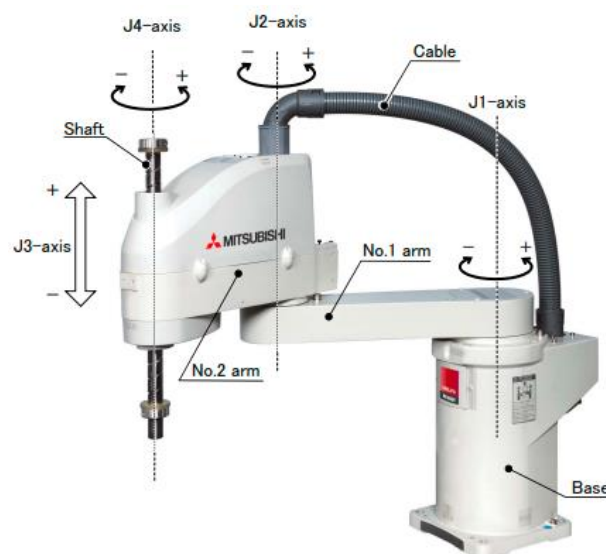


Figure 3.4 : Robot SCARA à 4 degrés de liberté MITSUBISHI RH-6SDH35xx [23]

Les dimensions du robot sont représentées par la figure (3.5). Cette représentation offre une vue détaillée et claire de notre robot. La figure (4.6) montre l'espace de travail du robot, c'est-à-dire l'espace atteignable par l'organe terminal.

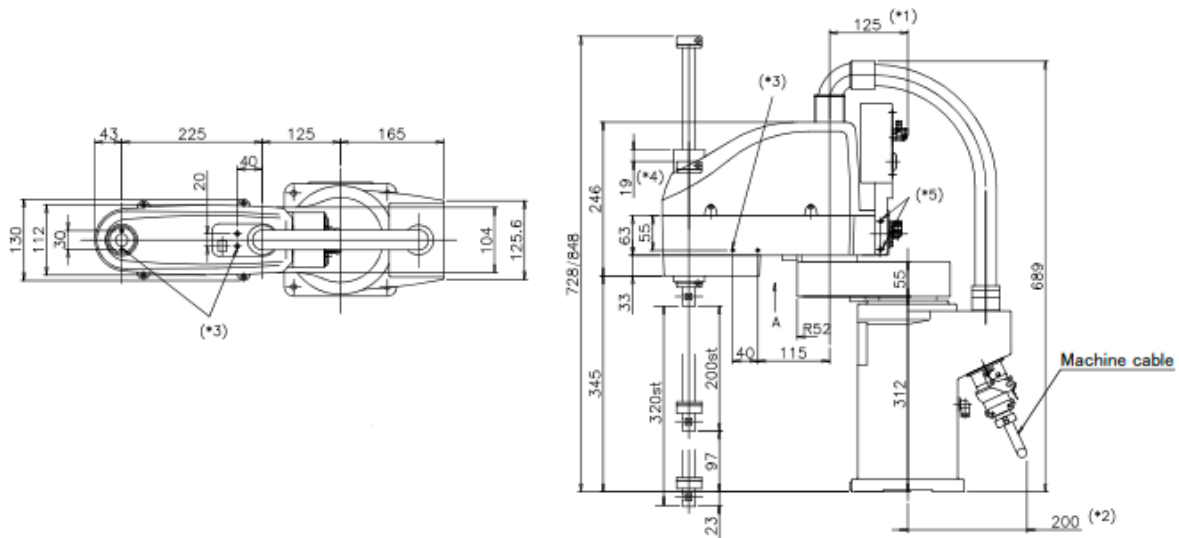


Figure 3.5 : Les dimensions du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx [23]

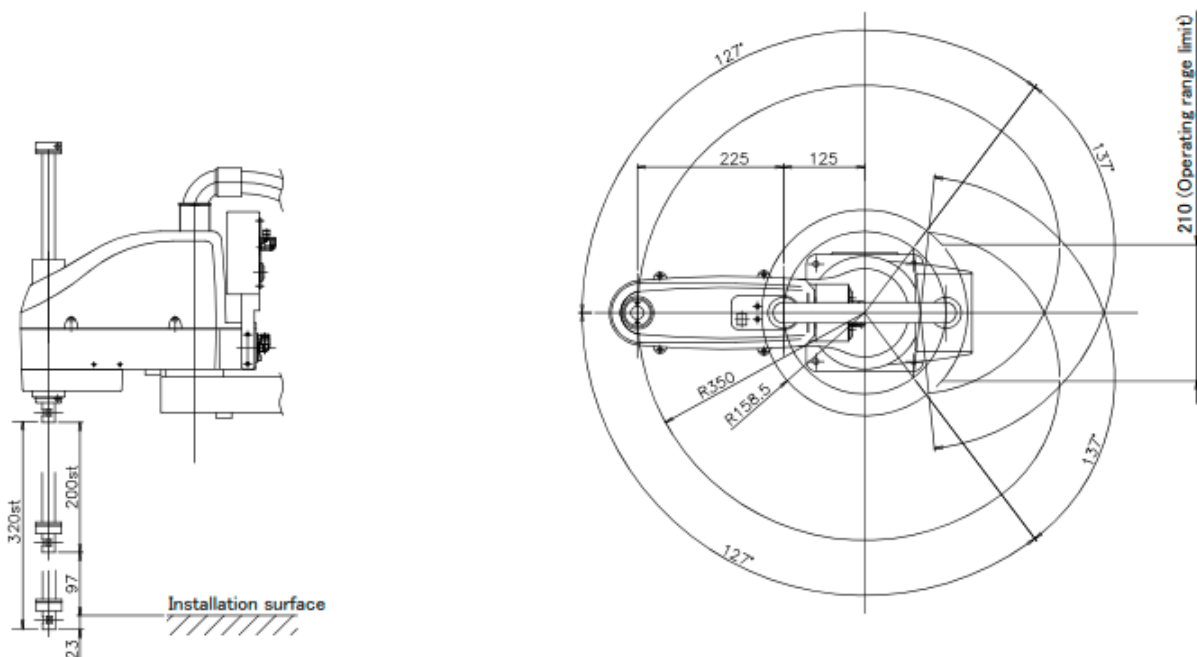


Figure 3.6 : Espace de travail du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx [23]

#### 4. Modélisation géométrique du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx

Pour décrire la morphologie de notre robot, nous utilisons la méthode de Denavit-Hartenberg. Toutefois, nous devons d'abord définir les repères sur notre robot (un repère pour chaque articulation) conformément aux règles de Denavit-Hartenberg déjà discutées au chapitre 2. La figure (3.7) montre la position des repères de chaque articulation du robot plus le repère final qui localise l'organe terminal.

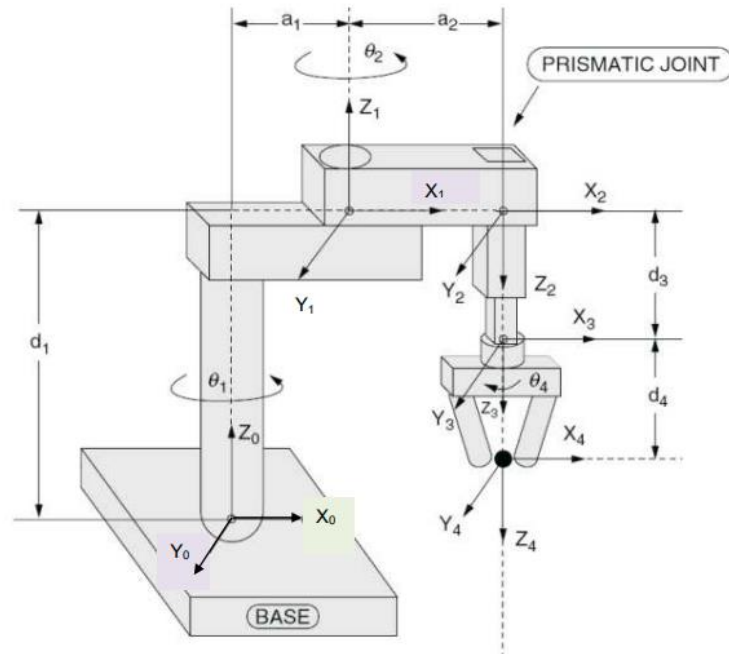


Figure 3.7 : Schéma d'un robot SCARA montrant l'affectation des repères

A partir de la figure (3.7), nous avons calculé les quatre paramètres de Denavit-Hartenberg correspondant à notre robot. Ces paramètres permettront par la suite au calcul des matrices de transformation homogène et du modèle géométrique direct. Les paramètres avec étoile sont les coordonnées articulaires du robot (3 rotations et une translation).

Joint (i)	$\delta_j$	$\theta_j$	$a_j$	$a_j$	$D_j$
1	0	$\theta_1^*$	0	$a_1$	$d_1$
2	0	$\theta_2^*$	$\pi$	$a_2$	0
3	1	0	0	0	$d_3^*$
4	0	$\theta_4^*$	0	0	$d_4$

Tableau 3.1 : Les paramètres de Denavit-Hartenberg du manipulateur SCARA

#### 4.1. Modélisation géométrique direct du robot

À partir du tableau D-H, les matrices  ${}^{i-1}T_i$  de taille  $[4 \times 4]$  représentent la transformation nécessaire pour passer du repère  $[R_{i-1}]$  au repère  $[R_i]$ . Pour notre cas nous avons quatre matrices à calculer. Nous allons donc remplacer es paramètres D-H calculés dans la matrice de transformation homogène décrite dans le chapitre 2.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & a_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Finalement, nous obtenons la matrice de transformation homogène du robot en multipliant de manière successive les matrices associées aux repères  $R_0$  jusqu'à  $R_4$ . Cette matrice globale est nommée Modèle Géométrique Direct du robot. D'une manière pratique elle permet de déterminer la position de l'organe terminal en connaissant les coordonnées articulaires.

Rappelons que la matrice (3x3) à gauche représente l'orientation de l'organe terminal, tandis que le vecteur (3x1) est son vecteur position.

$${}^0\mathbf{T}_4 = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4$$

$${}^0\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} C_{12}C_4 + S_{12}S_4 & -C_{12}S_4 + S_{12}C_4 & 0 & a_1C_1 + a_2C_{12} \\ S_{12}C_4 + C_{12}S_4 & -S_{12}S_4 - C_{12}C_4 & 0 & a_1S_1 + a_2S_{12} \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sachant que :  $\cos \theta_i = C_i$  ;  $\sin \theta_i = S_i$  ;  $\cos (\theta_i + \theta_j) = C_{ij}$  ;  $\sin (\theta_i + \theta_j) = S_{ij}$ .

On constate que dans le vecteur position, la quatrième coordonnée articulaire  $\theta_4$  correspondant à la rotation de l'organe terminal n'apparaît pas. En regardant de près le robot SCARA on constate que peu importe la valeur de cette coordonnée le robot reste dans la même position, ce n'est que son orientation qui change.

#### 4.2. Modélisation géométrique inverse

La détermination du modèle géométrique inverse est très importante dans le sens où on peut connaître à tout moment les coordonnées articulaires correspondant à une position désirées du robot. La connaissance du MGI est capitale dans la programmation des différentes tâches que le robot est sensé accomplir.

A partir du MGD on obtient la position de l'organe terminal. L'objectif est de déterminer les valeurs des trois coordonnées articulaires  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $d_3$  en fonction de  $x$ ,  $y$  et  $z$ . La dernière coordonnée  $\theta_4$  n'a pas d'influence sur la position de l'organe terminal comme nous l'avons déjà mentionné.

Avec :

$$\begin{cases} x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ z = d_1 - d_3 - d_4 \end{cases} \quad (3.6)$$

Pour le calcul u modèle géométrique inverse nous avons opté pour la méthode géométrique basée sur les calculs trigonométrique. Pour cela considérons la figure (3.8) qui montre la vue de dessus du robot en plan.

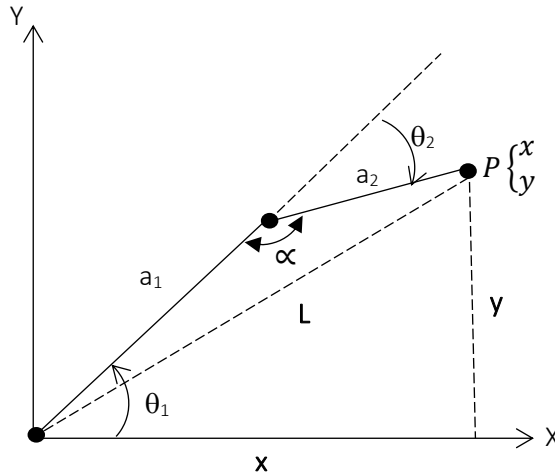


Figure 3.8 : Vue de dessus du robot SCARA

**Calcul de l'angle  $\theta_2$  :**

D'après le grand triangle on a les relations suivantes :

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

D'après la relation de Pythagore généralisée on a aussi à partir du deuxième triangle :

$$L^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\alpha) ; \text{ Avec : } \alpha = \pi + \theta_2 \text{ (}\theta_2 \text{ est un angle négatif),}$$

$$\text{D'où : } x^2 + y^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\theta_2) ; \text{ (on a : } \cos(\pi + a) = -\cos(a))$$

Soit :

$$\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + y^2 - (a_1^2 + a_2^2)}{2a_1a_2} \quad (3.7)$$

Sachant que :  $\cos(\theta_2) = a \in [-1 \ 1] \rightarrow \theta_2 = \arccos(a)$ , il résulte que :

$$\theta_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - (a_1^2 + a_2^2)}{2a_1a_2}\right) \quad (3.8)$$

**Calcul de l'angle  $\theta_1$  :**

D'autre part, en développant les expressions :  $\cos(\theta_1 + \theta_2)$  et  $\sin(\theta_1 + \theta_2)$  dans le système correspondant au modèle géométrique direct, on obtient :

$$\begin{cases} (a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) \cos(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_2) \sin(\theta_1) = x \\ (a_2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_1) + (a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) \sin(\theta_1) = y \end{cases} \quad (3.9)$$



On calcule le déterminant de ce système d'équations linéaires par rapport aux 2 inconnues  $\cos(\theta_1)$  et  $\sin(\theta_1)$ , on a :

$$\begin{bmatrix} a_1 + a_2 \cos(\theta_2) & -a_2 \sin(\theta_2) \\ a_2 \sin(\theta_2) & a_1 + a_2 \cos(\theta_2) \end{bmatrix} = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2) = x^2 + y^2 \quad (3.10)$$

Soient, via la méthode de carmer :

$$\cos(\theta_1) = \frac{\begin{bmatrix} x & -a_2 \sin(\theta_2) \\ y & a_1 + a_2 \cos(\theta_2) \end{bmatrix}}{x^2 + y^2} \quad (3.11)$$

Et :

$$\sin(\theta_1) = \frac{\begin{bmatrix} a_1 + a_2 \cos(\theta_2) & x \\ a_2 \sin(\theta_2) & y \end{bmatrix}}{x^2 + y^2} \quad (3.12)$$

Soient :

$$\cos(\theta_1) = \frac{1}{x^2 + y^2} (x(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) + ya_2 \sin(\theta_2))$$

$$\sin(\theta_1) = \frac{1}{x^2 + y^2} (y(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - xa_2 \sin(\theta_2))$$

Il en résulte :

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{y(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - xa_2 \sin(\theta_2)}{x(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) + ya_2 \sin(\theta_2)}\right) \quad (3.13)$$

**Calcul  $d_3$  :**

$$Z = d_1 - d_3 - d_4$$

Donc

$$d_3 = d_1 - d_4 - Z \quad (3.14)$$

Ainsi, cela nous amène au modèle géométrique inverse suivant :

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctg\left(\frac{y(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) - xa_2 \sin(\theta_2)}{x(a_1 + a_2 \cos(\theta_2)) + ya_2 \sin(\theta_2)}\right) \\ \theta_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - (a_1^2 + a_2^2)}{2a_1a_2}\right) \\ d_3 = d_1 - d_4 - Z \end{cases} \quad (3.15)$$

### 5. Simulation du MGD sous Matlab

En utilisant la boîte à outils de Peter Corke pour la robotique, nous avons pu simuler avec précision le modèle géométrique direct (MGD) de notre robot. Cette boîte à outils offre une gamme complète d'outils pour la modélisation, la simulation et le contrôle des robots. En créant une interface graphique MATLAB pour observer les mouvements 3D de notre robot, nous avons

conçu une plateforme comportant trois champs dédiés à l'édition et à l'affichage des articulations, ainsi que trois autres pour les coordonnées opérationnelles.

Les figures ci-dessous représentent des essais effectués pour le modèle géométrique direct.

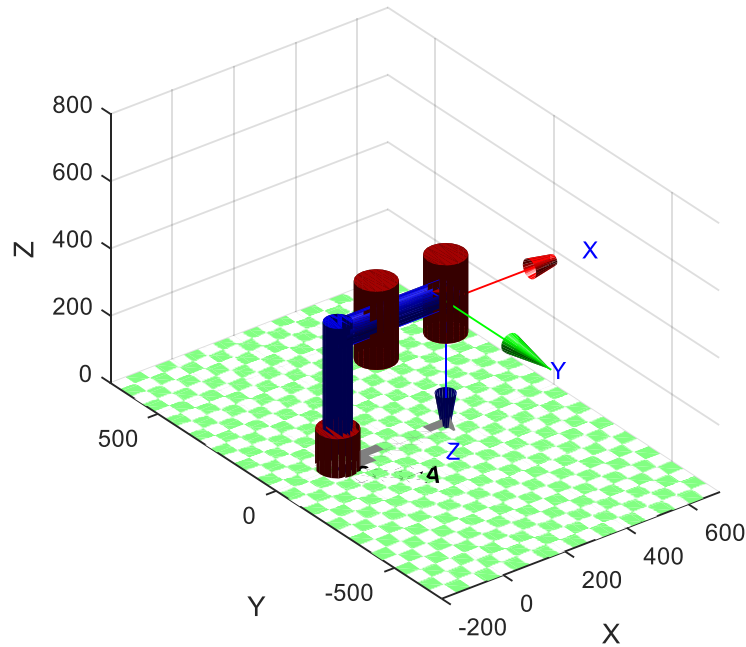
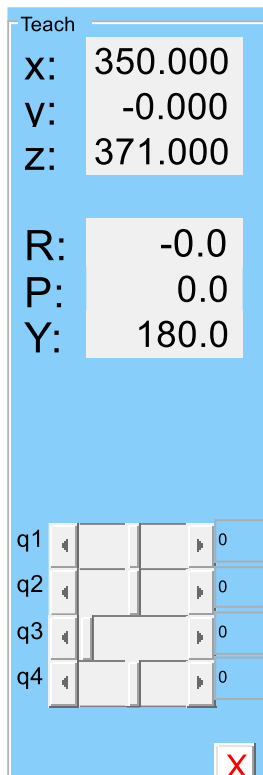


Figure 3.9 : Simulation sur MATLAB, position 1

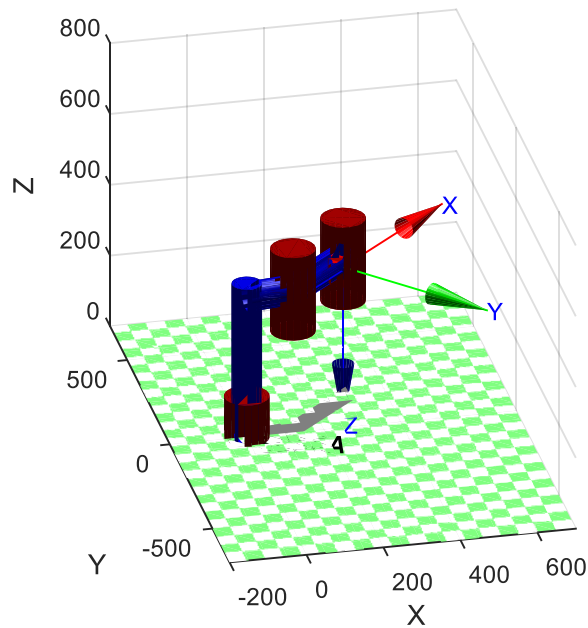
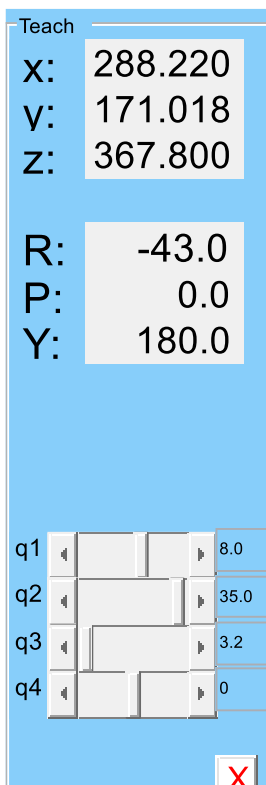


Figure 3.10 : Simulation sur MATLAB, position 2

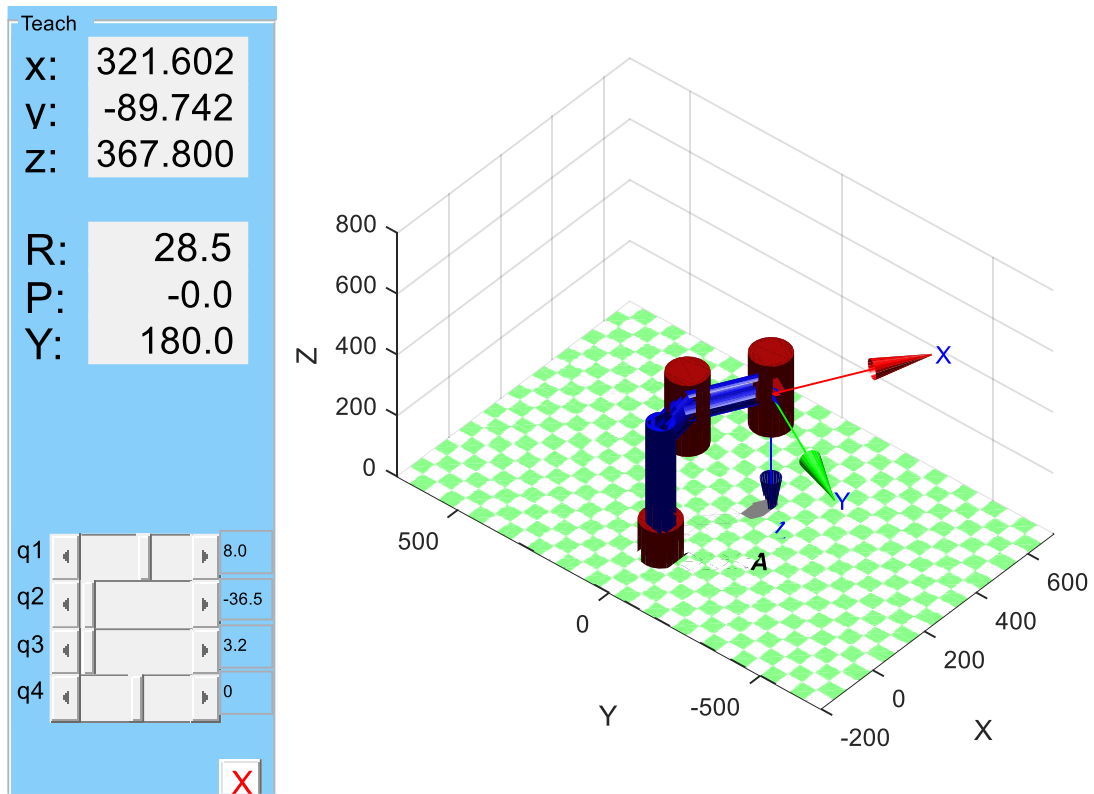


Figure 3.11 : Simulation sur MATLAB, position 3

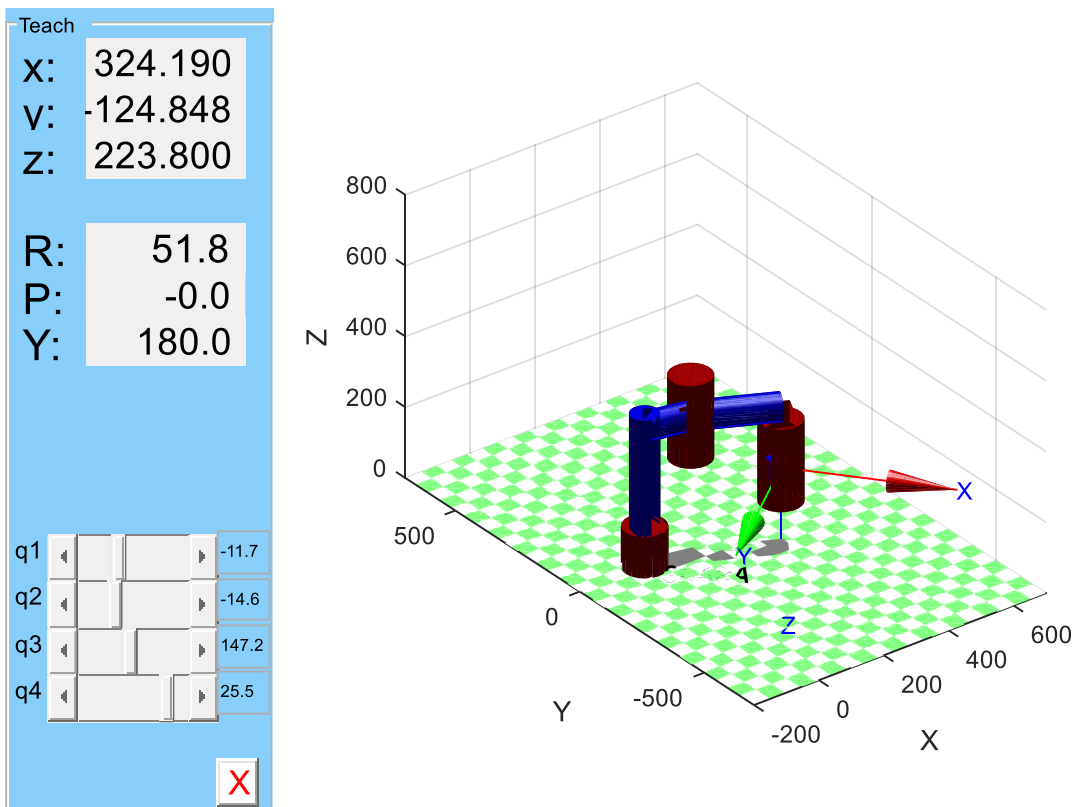


Figure 3.12 : Simulation sur MATLAB, position 4

## 6. Modélisation cinématique du robot SCARA

Le modèle cinématique directe est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3.16)$$

Avec :  $J(q) \in R^{m \times n}$  et la matrice Jacobienne

### 6.1. Utilisation de la matrice Jacobienne analytique

Par définition, la matrice Jacobienne analytique est la matrice des dérivées partielles de la fonction  $f(\theta_1, \theta_2, \theta_4, d_3)$  par rapport aux coordonnées généralisées, ainsi :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial d_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Sachant que :

$$\begin{cases} x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_4, d_3) \\ y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_4, d_3) \\ z = d_1 - d_3 - d_4 = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_4, d_3) \end{cases} \quad (3.18)$$

Après avoir effectué les calculs, nous obtenons la matrice Jacobienne analytique :

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Donc le modèle cinématique directe est exprimé comme suit :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

## 6.2. Utilisation de la matrice Jacobienne cinématique

### 6.2.1. Modèle cinématique direct

Comme déjà mentionné au chapitre 2, la matrice Jacobienne cinématique est représentée de la manière suivante :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix}_{6 \times n} \quad (3.21)$$

On commence par l'articulation rotoïde 1 et en posant  $i = 1$  (cf chapitre 2), nous obtenons :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times (d_4^0 \times d_0^0) \\ R_0^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 C_1 + a_2 C_{12} \\ a_1 S_1 + a_2 S_{12} \\ d_1 - d_3 - d_4 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Donc :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 - a_2 S_{12} \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Pour l'articulation rotoïde 2, en posant i=2 :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times (d_4^0 \times d_1^0) \\ R_1^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_2 C_{12} \\ a_2 S_{12} \\ -d_3 - d_4 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Donc :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 S_{12} \\ a_2 C_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Pour l'articulation prismatique 3, en posant i=3 :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 C_2 - S_1 S_2 & C_1 S_2 + S_1 C_2 & 0 \\ S_1 C_2 + C_1 S_2 & S_1 S_2 - C_1 C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Donc :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Pour l'articulation rotoïde 4, en posant i=4 :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_3^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times (d_4^0 \times d_3^0) \\ R_3^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$= \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 C_2 - S_1 S_2 & C_1 S_2 + S_1 C_2 & 0 \\ S_1 C_2 + C_1 S_2 & S_1 S_2 - C_1 C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Donc :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Pour rendre l'écriture de notre matrice Jacobienne cinématique plus claire, nous avons :

$$J = \begin{bmatrix} j_v \\ j_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 - a_2 S_{12} & -a_2 S_{12} & 0 & 0 \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} & a_2 C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Finalement, le modèle cinématique directe est exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix}_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 - a_2 S_{12} & -a_2 S_{12} & 0 & 0 \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} & a_2 C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (3.32)$$

On remarque bien que la première partie de la matrice Jacobienne cinématique est exactement similaire à la matrice Jacobienne analytique décrite par l'équation (3.19).

### 6.2.2. Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (3.33)$$

Pour calculer la matrice jacobienne inverse, nous négligeons  $\dot{\theta}_4$  afin d'obtenir une matrice carrée (3x3), en utilisant la matrice des cofacteurs :

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \times c^t \quad (3.34)$$

$$\det(J) = \begin{bmatrix} -a_1 S_1 - a_2 S_{12} & -a_2 S_{12} & 0 \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} & a_2 C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = -a_1 a_2 S_2 \quad (3.35)$$

Après avoir calculé la matrice des cofacteurs, on obtient :

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \times c^t = \frac{1}{-a_1 a_2 S_2} \times \begin{bmatrix} -a_2 C_{12} & -a_2 S_{12} & 0 \\ a_1 C_1 + a_2 C_{12} & a_1 S_1 - a_2 S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_1 a_2 S_2 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Donc, la matrice Jacobéenne inverse  $J^{-1}$  est :

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{C_{12}}{a_1 S_2} & \frac{S_{12}}{a_1 S_2} & 0 \\ -\frac{a_1 C_1 - a_2 C_{12}}{a_1 a_2 S_2} & -\frac{a_1 S_1 - a_2 S_{12}}{a_1 a_2 S_2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Finalement, le modèle cinématique inverse est exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_{12}}{a_1 S_2} & \frac{S_{12}}{a_1 S_2} & 0 \\ -\frac{a_1 C_1 - a_2 C_{12}}{a_1 a_2 S_2} & -\frac{a_1 S_1 - a_2 S_{12}}{a_1 a_2 S_2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé une variété de modèles utilisés pour décrire les mouvements des articulations d'un robot de type SCARA MITSUBISHI. Ensuite, nous avons établi les divers modèles mathématiques nécessaires à la programmation et au contrôle du robot. Nous avons développé ensuite un programme de simulation par l'utilisation du logiciel MATLAB et la boîte à outil Peter Corke pour décrire le modèle géométrique direct. Grâce à cette simulation, nous avons la possibilité de trouver en temps réel la position de l'organe terminal du robot en fonction des coordonnées articulaires.

La modélisation cinématique nous a permis de trouver le modèle cinématique direct et inverse du robot. En utilisant deux approches différentes, le modèle cinématique direct nous permet de déterminer les vitesses de l'organe terminal en fonction des coordonnées et vitesses articulaires. Par ailleurs le modèle cinématique inverse nous permet de déterminer les vitesses articulaires nécessaires pour avoir des vitesses désirées de l'organe terminal.

Enfin et par manque de données nous n'avons pas pu établir le modèle dynamique du robot.





## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises. SW est assez intuitif. Modéliser une pièce est assez rapide contrairement à d'autres logiciels de CAO. La version utilisée dans notre travail est celle de 2016 [25]. L'application SW offre des Fenêtres, des outils et des fonctionnalités d'interface utilisateur qui vous aident à créer et à éditer efficacement les modèles. Les figures ci-dessous illustrent certaines fenêtres du logiciel SolidWorks.

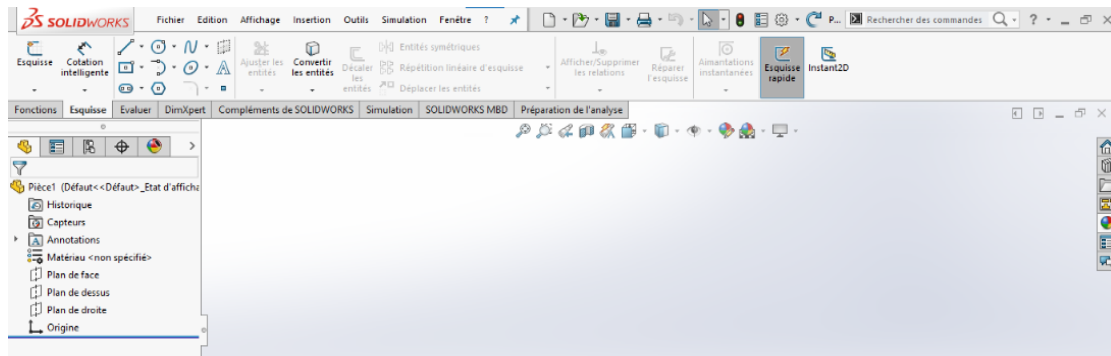


Figure 4.3 : Interface SolidWorks

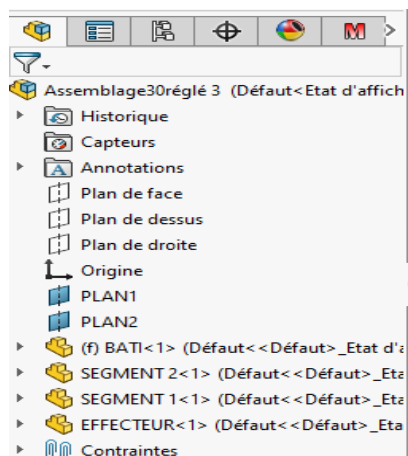


Figure 4.4 : Configuration Manager

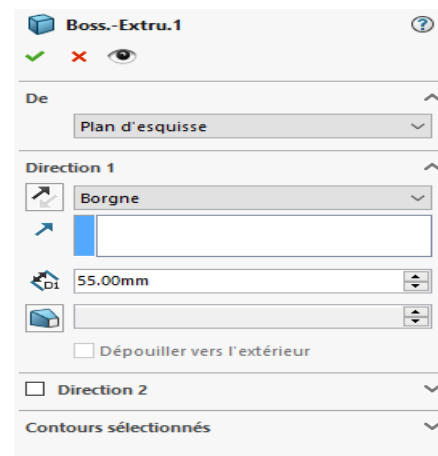


Figure 4.5 : Property Manager

### 3. Conception du robot SCARA

Tout d'abord, nous allons identifier les éléments de base constituant les différentes classes d'équivalence cinématique (CEC) du robot SCARA, qui forment la chaîne cinématique minimale.

Le robot SCARA se compose de quatre pièces essentielles comme l'indique le tableau (4.1).

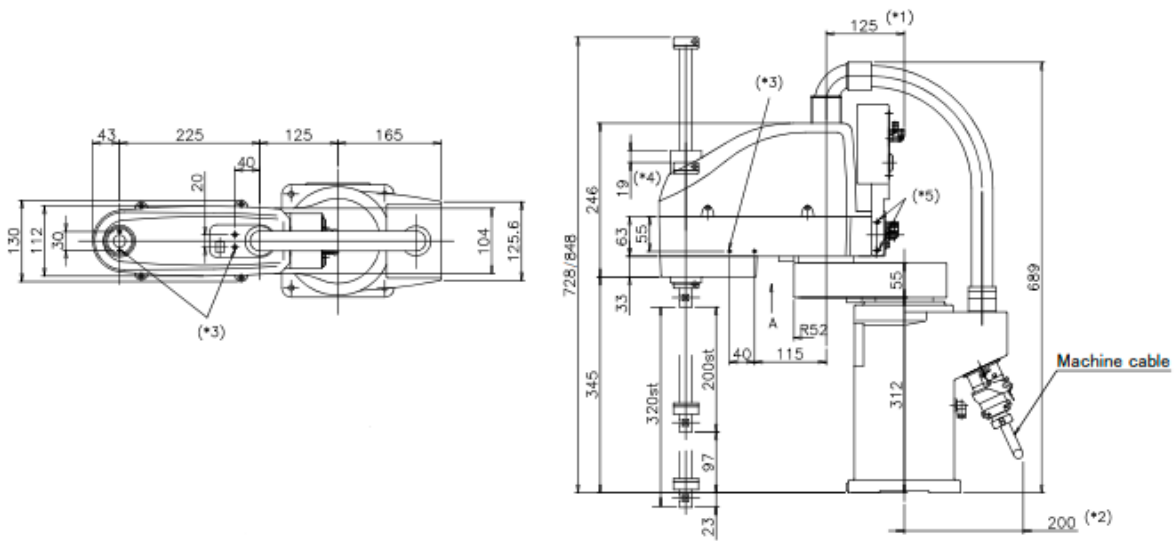
La conception du robot SCARA se déroule en plusieurs étapes dont les principales sont :

1. Définir les dimensions des composants du système mécanique.
2. Concevoir ses composants.
3. Assembler les différents éléments.

Eléments de base du robot SCARA	Arbre de construction
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le bâti (la base)</li> <li>- Segment 1</li> <li>- Segment 2</li> <li>- Effecteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ (f) BATI&lt;1&gt;</li> <li>▶ (-) SEGMENT 1&lt;1&gt;</li> <li>▶ (-) SEGMENT 2&lt;1&gt;</li> <li>▶ (-) EFFECTEUR&lt;1&gt;</li> </ul>

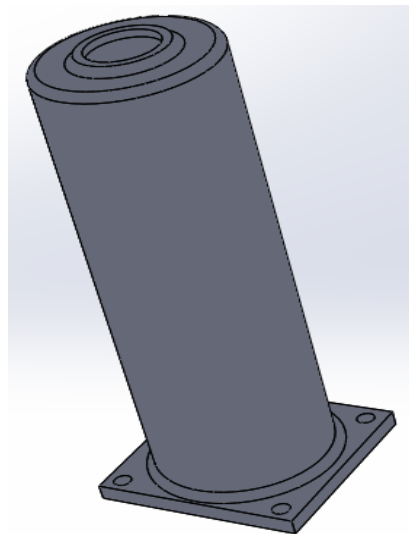
**Tableau 4.1. Pièces essentielles du robot SCARA**

Le design (dessin d'ensemble de la figure (4.6) et dessins de définitions des pièces « Annexe A »), montrent les dimensions de notre robot sur lequel nous avons travaillé.



**Figure 4.6 : Les dimensions du robot SCARA MITSUBISHI RH-6SDH35xx [23]**

Après avoir conçu les pièces du robot sur SolidWorks, nous commençons par faire appel à la partie fixe qui est le corps (bâti) (figure 4.7).



**Figure 4.7 : Dessin du corps fixe (bâti)**

#### Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

Ensuite, Dans le logiciel SolidWorks nous faisons l'assemblage des pièces une par une et tout en respectant l'ensemble des contraintes nécessaires et suffisantes pour assurer un fonctionnement correct du robot.

Les contraintes doivent être choisies d'une manière judicieuse et donnant naissance à des liaisons élémentaires assurant les degrés de libertés nécessaire du robot.

Ainsi, nous allons assembler la deuxième pièce (segment 1) avec le bâti. Pour contraindre la deuxième pièce avec le bâti on doit sélectionner les surfaces de contact de chaque pièce. Appliquez-leur ensuite une contrainte de coaxialité et coïncidente, comme illustré dans les figures ci-dessous.

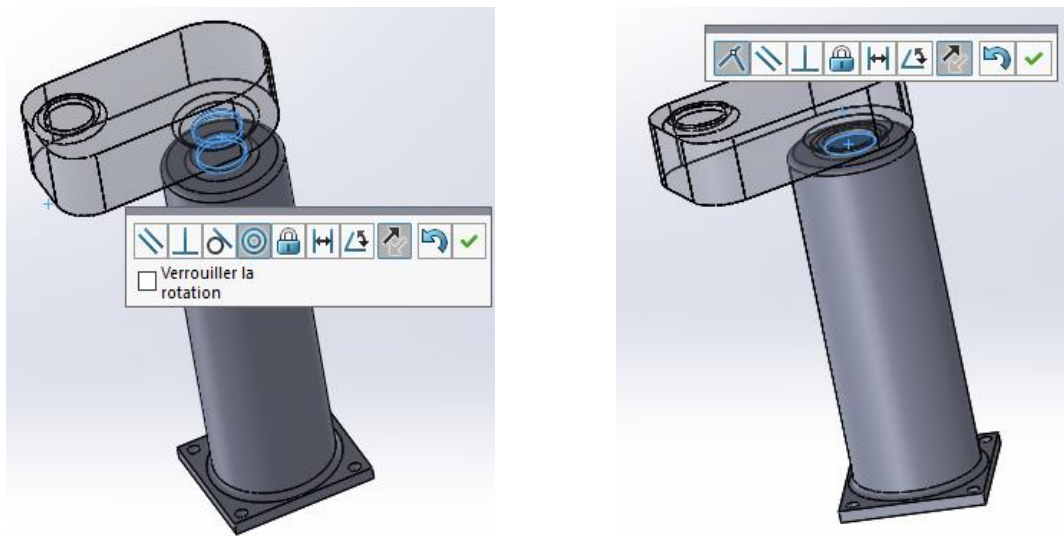


Figure 4.8 : Assemblage segment 1/corps

On refait les mêmes étapes avec le segment 1 et le segment 2, on ajoute une contrainte de coaxialité et coïncidente. Une contrainte encore de coïncidence entre le trou du segment 2 et l'effecteur, ainsi qu'une autre contrainte de distance où l'effecteur peut glisser verticalement dans le trou sur une distance de 320 mm.

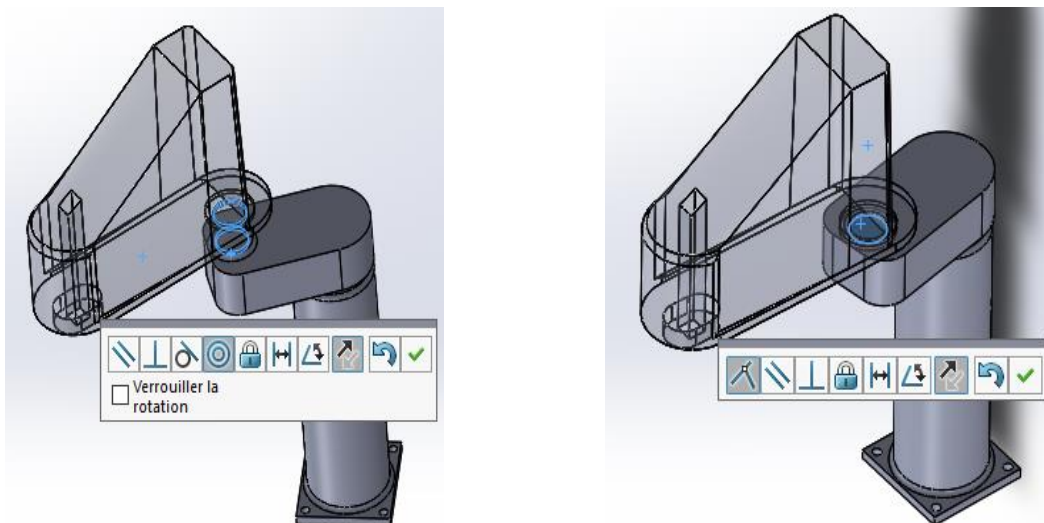
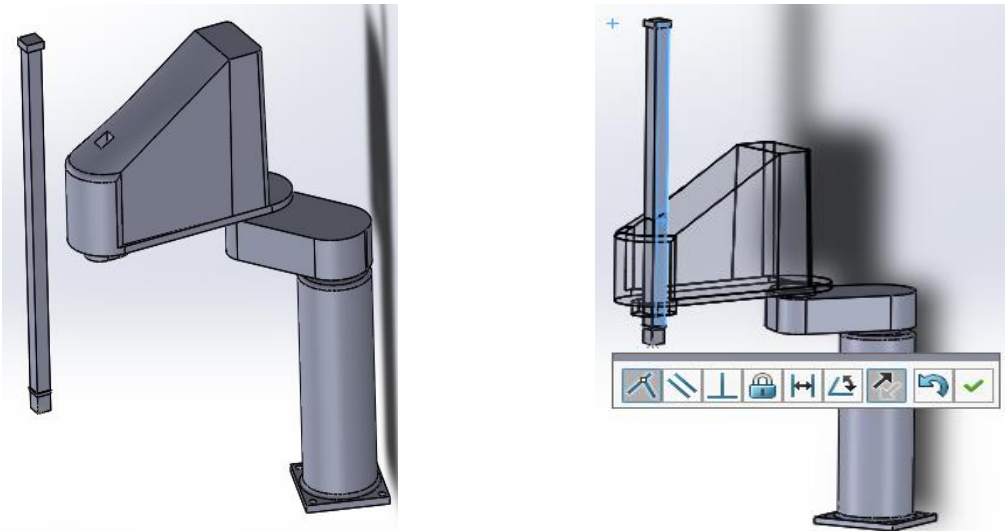
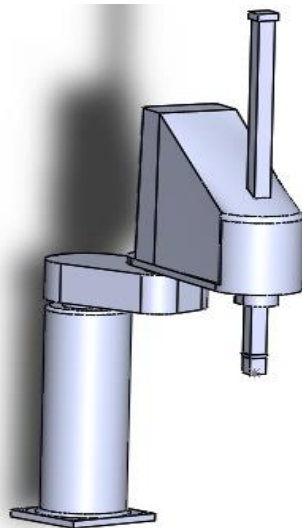


Figure 4.9 : Assemblage segment 1/segment 2



**Figure 4.10 : Assemblage l'effecteur/segment 2**

À la fin, après avoir assemblé tous les composants de notre robot, nous arrivons au résultat final comme illustré dans la figure (4.11).



**Figure 4.11 : Le Robot SCARA complet**

#### **4. Création des contours de trajectoire relatifs aux espaces de travail**

Pour créer une conception de contour de trajectoire relative à l'espace de travail du robot SCARA sur SolidWorks, nous suivons les étapes suivantes :

1. Nous utilisons des esquisses pour déterminer la trajectoire que le robot SCARA suivra dans son espace de travail. Cette trajectoire peut être simple ou complexe, selon l'application.
2. Nous nous assurons ensuite que le contour de trajectoire est correctement défini et qu'il reste dans les limites de l'espace de travail du robot SCARA.

Nous avons créé deux courbes de trajectoire dans deux plans différents (vertical et horizontal) comme indiqué dans les figures (4.12) et (4.13).

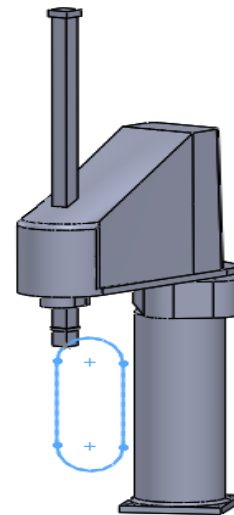
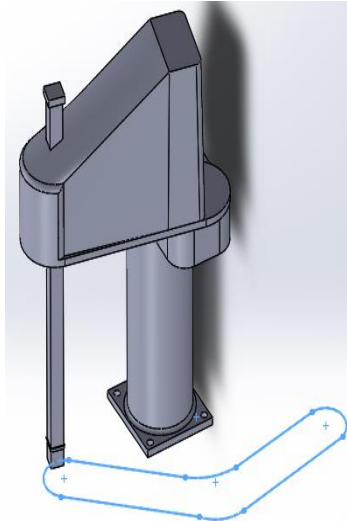


Figure 4.12 : Contour de trajectoire/plan 01    Figure 4.13 : Contour de trajectoire/plan 02

## 5. Etude cinématique, sous SolidWorks Motion, du robot SCARA

### 5.1. Description du modèle

Le logiciel de simulation de mouvement permet d'étudier le déplacement, la vitesse et l'accélération des composants mobiles. En simulant, dans notre cas, les éléments en mouvement constituant les différentes classes d'équivalences du robot SCARA, l'utilisateur peut analyser le comportement cinématique des différents paramètres de ces éléments.

### 5.2. Simulation sous SolidWorks

L'utilisation de SolidWorks Motion Simulation pour modéliser et analyser le robot SCARA permet de simuler et d'optimiser les mouvements et les performances du système dans un environnement virtuel. Cette simulation dynamique permet d'étudier les trajectoires, les vitesses et les accélérations des différents axes du robot, tout en tenant compte des contraintes mécaniques et des forces appliquées. Grâce à cette analyse, il est possible de détecter et de résoudre les problèmes potentiels de conception avant la fabrication physique, ce qui réduit les coûts et les temps de développement.

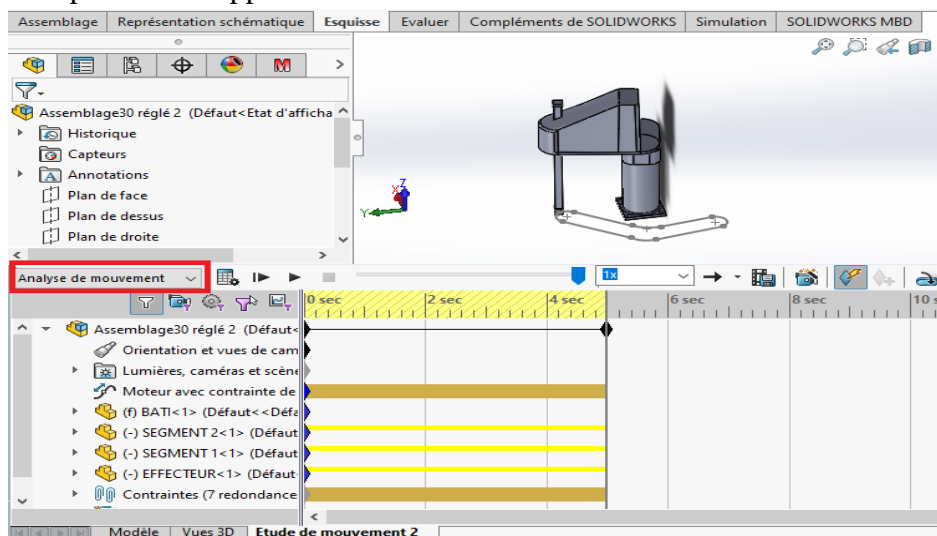


Figure 4.14 : Analyse de mouvement dans SolidWorks Motion

## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

SolidWorks offre également des outils pour visualiser les interactions entre les composants, tester différents scénarios d'exploitation et valider les performances globales du robot SCARA dans des conditions réelles, assurant ainsi une mise en service plus efficace et une meilleure fiabilité opérationnelle. Dans SolidWorks motion, l'outil Analyse de mouvement est le plus évolué des outils d'analyse de mouvement, il reflète tous les éléments d'analyse requis, par exemple propriétés d'inertie, forces externes, contacts, frottement de contrainte, etc.

Pour passer à SolidWorks Motion, il faut cliquer sur l'onglet Animation1 dans le coin inférieur gauche.

### 5.3. Etapes de la simulation

Pour garantir une simulation réussie du robot SCARA, il faut suivre les étapes suivantes.

#### 5.3.1. Définition des composants fixes et mobiles

Les composants fixes et mobiles dans SolidWorks Motion sont déterminés par leur état Fixe/Libéré dans le modèle SolidWorks. Dans notre cas, le composant 'Base' est fixe tandis que les trois (03) autres éléments se déplacent, cela est illustré dans l'arbre de construction.

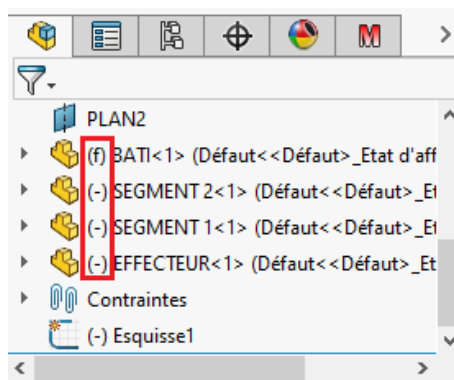
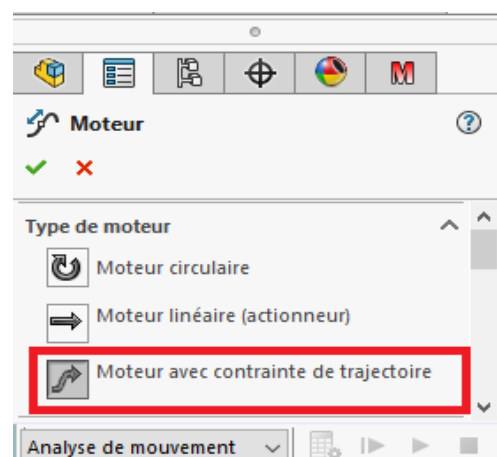


Figure 4.15 : Assemblage des éléments de base du robot SCARA

#### 5.3.2. Spécification du mouvement d'entrée

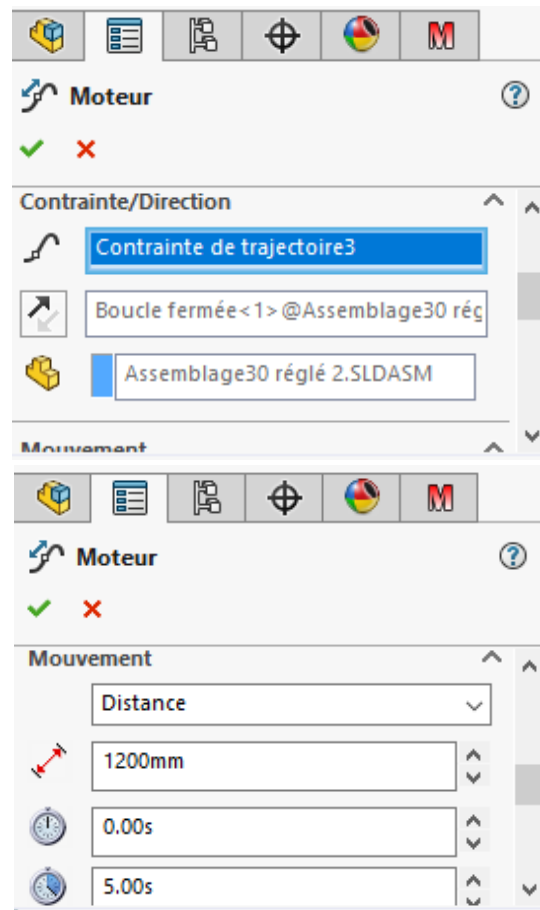
Nous allons ensuite définir un mouvement pour notre robot. Dans notre cas, nous voulons que le robot suive la trajectoire que nous lui avons tracée, comme indiqué dans les figures (4.12) et (4.13) précédentes.

Dans l'onglet Motion Study, Cliquez à l'aide du bouton droit de la souris sur l'icône Moteur, Choix du type de moteur avec la trajectoire





Lier le moteur au trajet : Contrainte du moteur pour suivre le trajet en sélectionnant l'option appropriée dans les paramètres du moteur. Cela permettra à l'effecteur du robot SCARA de se déplacer le long de la trajectoire spécifiée.



Sous Mouvement, sélectionnez Distance et entrez la valeur de 1200 mm, puis choisissez la durée pour que le robot fasse un tour complet sur la trajectoire. Une fois les données introduites, cliquez sur OK pour fermer la boîte de dialogue Moteur.

### 5.3.3. Exécution de la simulation

Dans SolidWorks Motion Manager, cliquez sur l'icône Calculer.

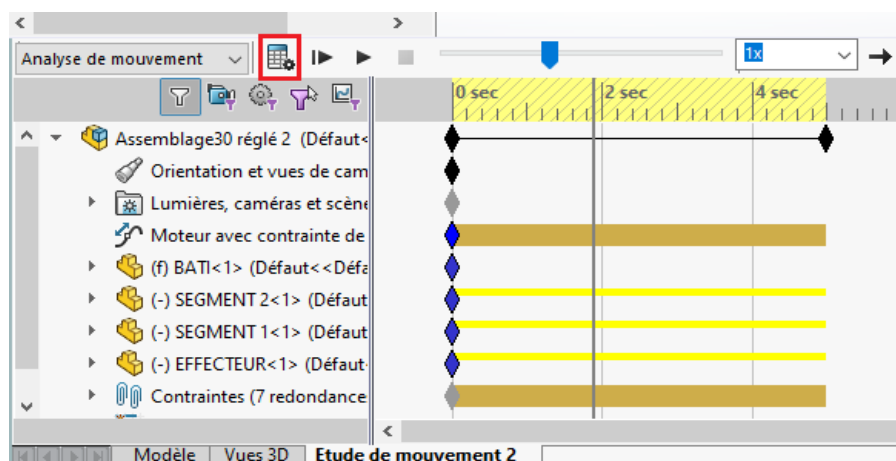
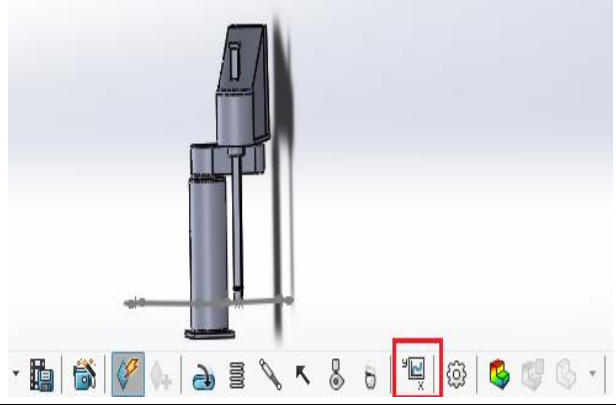
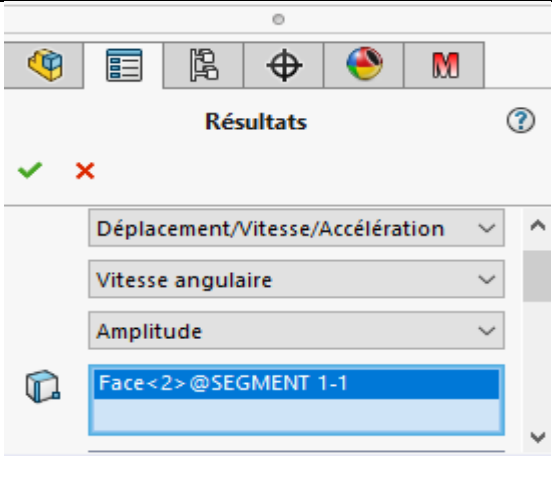


Figure 4.16 : Exécution de la simulation

### 5.3.4. Analyse et extraction des résultats de l'étude

Dans notre étude, nous allons nous concentrer sur l'extraction des principaux paramètres cinématiques des éléments mobiles du robot à savoir la vitesse (angulaire et linéaire), l'accélération (angulaire et linéaire) et du déplacement du segment 1, segment 2 ainsi que de l'effecteur (organe exécutif).



<p>Commençons par cliquer sur l'icône Résultats et graphes pour ouvrir la boîte de dialogue Résultats.</p>	
<p>-Sous Résultats, sélectionnez Déplacement/Vitesse/Accélération, et Amplitude. Toujours sous Résultats, sélectionnez bleue. (Lorsque vous sélectionnez une contrainte ou une pièce, SolidWorks Motion affiche le système de coordonnées par défaut qui servira pour la sortie des résultats)</p> <p>-Nous répétons la même méthode pour l'accélération angulaire et le déplacement de tous les éléments mobiles du robot.</p>	

Nous avons examiné les performances du robot SCARA en suivant deux trajectoires distinctes. La première trajectoire est dans le plan vertical (plan 01), la deuxième trajectoire est dans le plan horizontal (plan 02), comme indiqué dans les figures 4-12 et 4-13 précédentes. Ainsi, il est aisément possible d'extraire l'ensemble des paramètres cinématiques et géométriques de n'importe quel point du robot SCARA.

### **5.3.5. Exemples de graphes déterminés après simulation par SolidWorks Motion/Plan 01**

#### **5.3.5.1. Vitesses et accélérations**

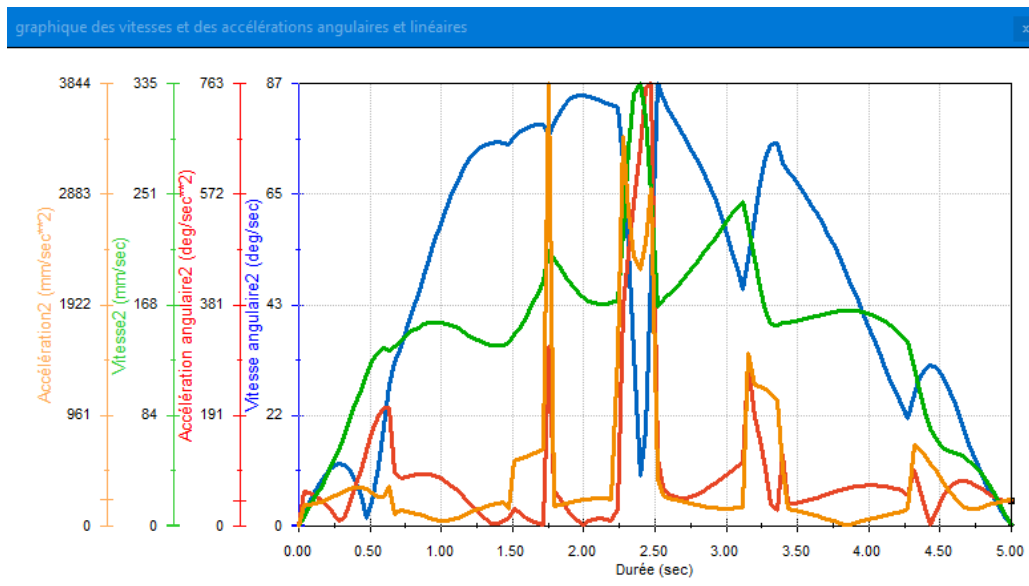
Après introduction des données cinématiques respectant la loi entrée-sortie du robot SCARA, nous avons procédé à l'extraction des paramètres cinématiques des éléments mobiles du robot (Segments et Effecteur).

Ainsi et pour un point spécifique de chaque élément nous avons pu représenter, respectivement, sur les figures (4.17) et (4.18), les vitesses et les accélérations, angulaires (en deg/s) et linéaires (en mm/s) relatives au plan 01. L'ensemble des figures nous donne une idée sur la capacité de SolidWorks à associer plusieurs résultats dans un même graphique.

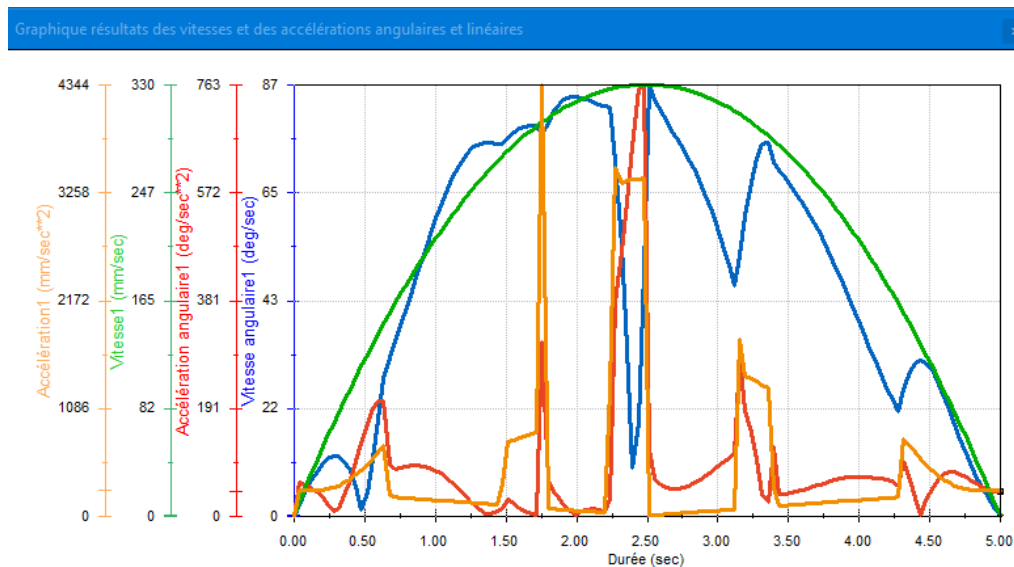
Prenons comme exemple la figure (4.18) qui montre clairement la flexibilité de SolidWorks Simulation dans la représentation graphique des résultats ; puisqu'il est possible d'associer plusieurs courbes (vitesses et accélérations), pour des fins comparatives dans une même représentation, ce qui rend l'interprétation plus aisée.

## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

Nous remarquons que le robot SCARA a une accélération élevée par rapport à sa vitesse, cette caractéristique est particulièrement avantageuse dans les applications nécessitant des mouvements rapides et précis.



**Figure 4.17 : Variations de la vitesse et de l'accélération d'un point appartenant au segment 2**



**Figure 4.18 : Variations de la vitesse et de l'accélération d'un point appartenant à l'effecteur**

### 5.3.5.2. Trajectoires des points particuliers

La figure (4.19) représente la courbe de trajectoire, à titre d'exemple, du centre de gravité de l'effecteur du robot SCARA dans le plan 01. Cette représentation traduit exactement la contrainte de trajectoire que nous avons utilisée pour tracer l'espace de travail du robot dans le plan 01.

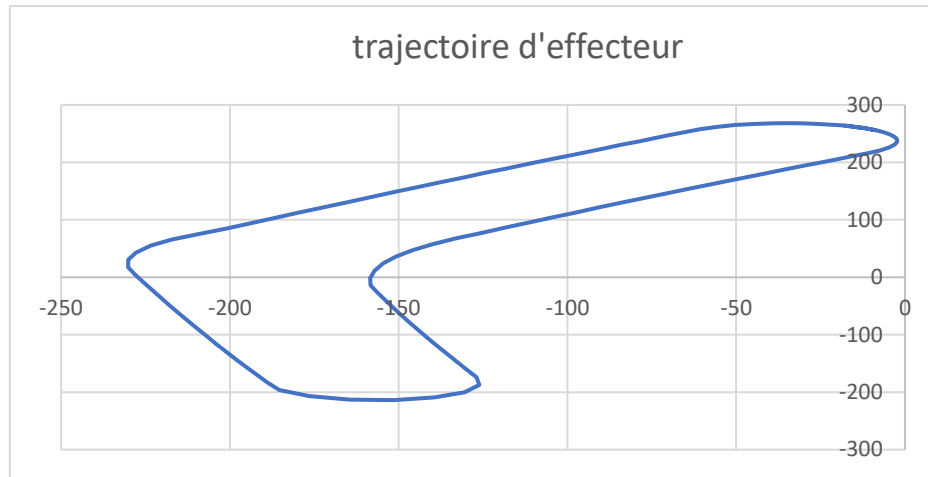


Figure 4.19 : Trajectoire d'effecteur/plan 1

A travers cette dernière figure, nous retrouvons bien l'allure de la courbe illustrons ainsi le chemin suivi par l'effecteur (organe exécutif) et comme nous pouvons le constater cette forme correspond bien à la courbe contrainte de trajectoire que nous avons élaboré et utilisé pour définir l'espace de travail dans le plan 01. Ainsi l'allure trouvé confirme la fiabilité de cet outil de simulation ce qui valide notre modèle (du point de vue cinématique).

### 5.3.6. Exemples de graphes déterminés après simulation par SolidWorks Motion/Plan 02

Après introduction des différents paramètres de la loi entrée-sortie et exécution de la simulation, il est simple et rapide de faire sortir sous forme de courbes, l'évolution de l'ensemble des paramètres régissant la loi entrée-sortie de notre robot. Ainsi, les figures (4.20) et (4.21), nous donnent une idée sur les variations des vitesses et des accélérations angulaires (en deg/s) et linéaires (en mm/s) du robot SCARA pour des points spécifiques du segment 2 et de l'effecteur et cela dans le second plan 02.

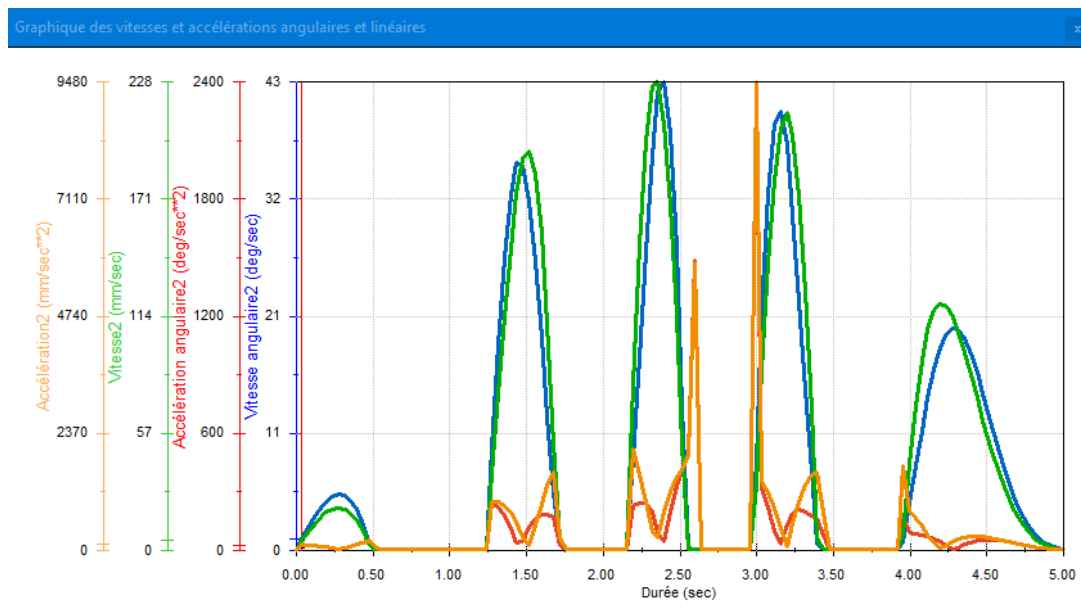


Figure 4.20 : Paramètres de la vitesse et de l'accélération du segment 2

## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

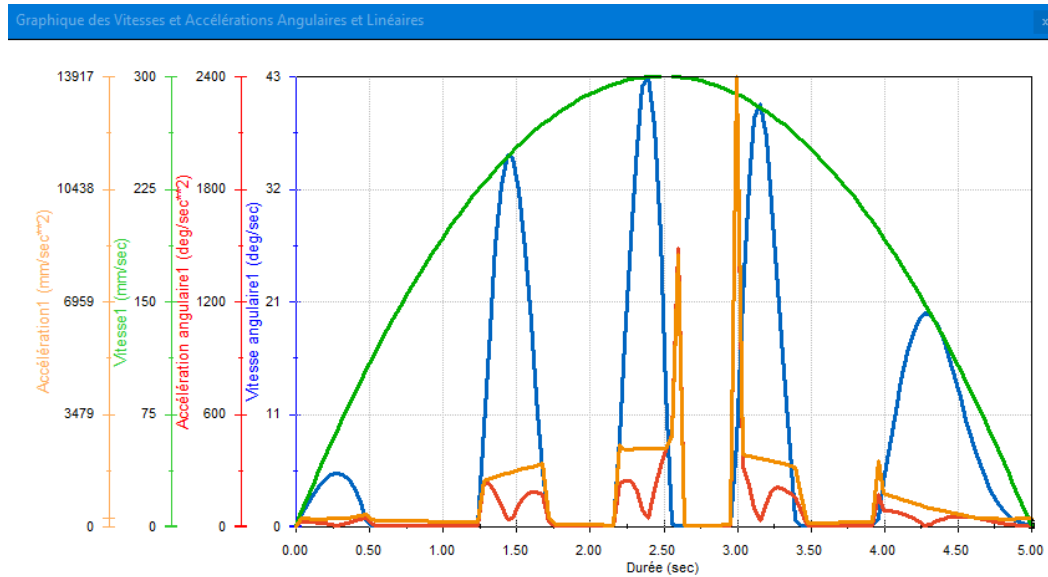


Figure 4.21 : Paramètres de la vitesse et de l'accélération de l'effecteur

Afin de vérifier et de valider les résultats de notre simulation dans le plan 02, nous avons procédé, comme dans la première partie, à la détermination de la courbe de trajectoire qu'un point quelconque appartenant à l'effecteur doit parcourir lors de son déplacement. La courbe de la figure (4.22) reprend bien la contrainte de trajectoire que nous avons élaborée et utilisé comme parcours de l'espace de travail.

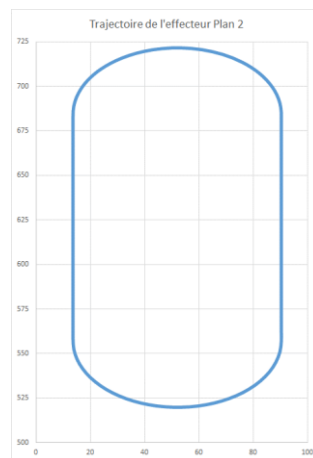


Figure 4.22 : Trajectoire d'un point appartenant à l'effecteur\plan02

## 6. Etude cinématique et géométrique sous MECAD3D, complément de SolidWorks

### 6.1. Présentation du MECA3D

Après la prise en main de SolidWorks et de ses applicatifs Motion et Simulation nous nous sommes intéressés à un autre complément de SolidWorks et qui est MECA3D, ce logiciel produit par la société ATEMI MECA3D est un logiciel destiné à l'analyse des mécanismes spatiaux (exemple robot) sous les 3 aspects suivants :

**Aspect géométrique** : Recherche des positions successives des pièces du mécanisme au cours du temps et des déplacements relatifs dans les liaisons

**Aspect cinématique** : Détermination des vitesses et accélérations dans les mouvements entre les pièces du mécanisme

## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

**Aspect statique ou dynamique** : Détermination du mouvement et des efforts dans les liaisons en fonction des efforts extérieurs appliqués et des caractéristiques cinétiques des pièces (pour la dynamique) [26].

Dans notre cas, nous allons procéder à l'étude de notre robot SCARA du point de vue géométrique et cinématique

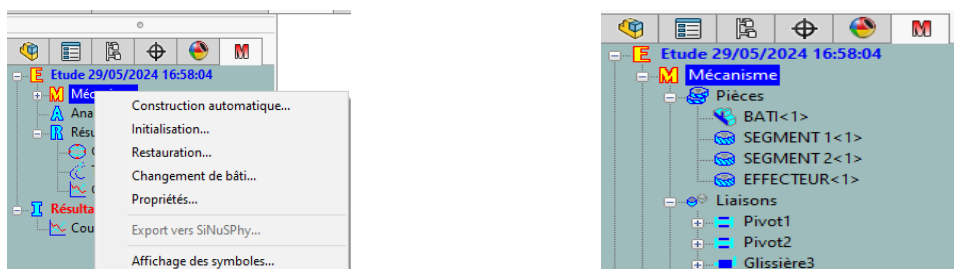
### 6.2. Optimisation par MECA3D du robot SCARA

Afin d'obtenir une simulation, il est nécessaire dans MECA3D [25]:

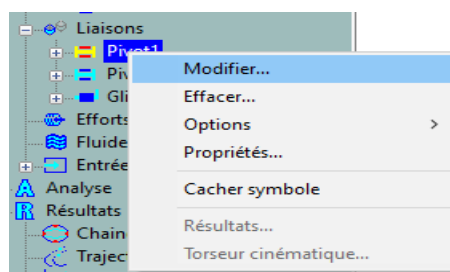
- De déclarer les ensembles indéformables (groupement de pièces qui n'ont aucun mouvement relatif entre elles : Classes d'Equivalences Cinématiques : CEC) ce qui a été déjà réalisé, sur SolidWorks.
- De préciser les liaisons (spécifiant les mouvements possibles) entre ces ensembles ;
- Garantir l'isostatisme du système que nous allons étudier et identifie les inconnues hyperstatiques si elles existent ; le logiciel MECA3D propose des modifications visant à rendre le mécanisme isostatique.

### 6.3. Définition du modèle cinématique

Pour la création des liaisons entre les C.E.C (classes d'équivalences cinématiques) nous devons cliquer droit sur Mécanisme puis sur Construction automatique. Ce chemin est indiqué pour un ensemble dont les contraintes sont bien définies et qui ne nécessitent pas des liaisons équivalentes par exemples.



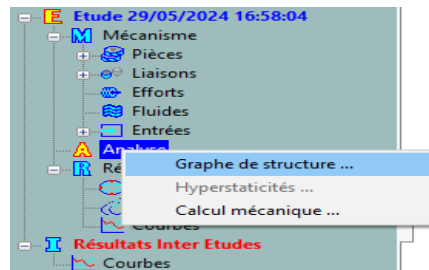
Dans le cas échéant, il faut procéder à la modification manuelle des liaisons ; Pour faire cela il faut cliquer droit sur la liaison qu'on veut modifier ensuite sur Modifier.



Généralement, l'étude cinématique par la méthode analytique, de ce type de système à chaîne ouverte (Cas de notre robot) est très difficile à réaliser étant donné que le nombre d'inconnues est toujours supérieurs au nombre d'équations, c'est pour cette raison nous avons utilisé le MECA3D, comme un second moyen de calcul, pour trouver les différents paramètres

## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

cinématiques de la loi entrée-sortie du robot SCARA. Une fois que les pièces et les liaisons du robot ont été entrées, et avant de procéder au premier calcul, il est possible de consulter le graphe de structure du mécanisme.



Sur ce graphe, des modifications d'apparence sont possibles (zoom, déplacement, police...).

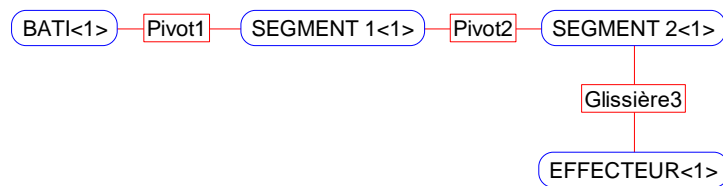


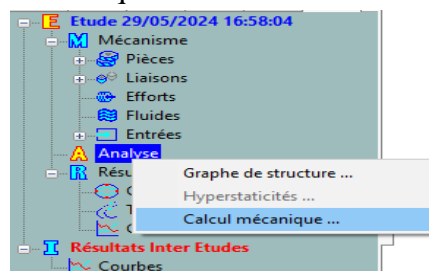
Figure 4.23 : Graphe de structure du robot SCARA

Le caractère ouvert de la chaîne (cas des robots) a été vérifié en cliquant simplement sur graphe de structure (figure 4.23).

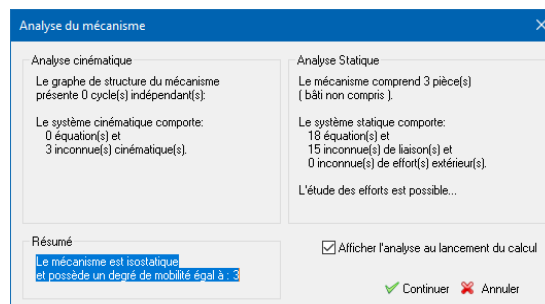
### 6.4. Simulation, par MECA3D, du comportement cinématique et géométrique du robot SCARA

#### 6.4.1. Etude cinématique

Clic droit sur Analyse / Calcul mécanique :



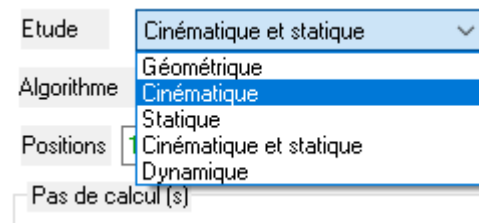
Dans un premier temps MECA3D affiche un résumé des analyses statique et cinématiques (degré de mobilité, hyperstaticité, nombre d'équations, nombre d'inconnues cinématiques et statiques.....).



## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

Suite à l'analyse automatique par MECA3D, nous pouvons dire nous sommes en présence d'un mécanisme isostatique (degré d'hyperstatique  $h=0$ ), chose que nous souhaitons trouver. Donc il n'est pas nécessaire de faire une modification sur du robot SCARA. Il est à noter que dans notre situation, le module d'analyse a identifié trois degrés de liberté, même si notre robot possède initialement quatre degrés de liberté. Nous avons supprimé un degré de liberté pour éviter le problème de liaison piloté 2 fois.

Choisir le type d'étude : cinématique



Sélectionner les liaisons Pivot 1, pivot 2 et glissière 3 et imposer les valeurs des vitesses comme suit : pivot 1 = 50 tr/min, pivot 2 = 20 tr/min, glissière 3 = -0.025 m/s.

N°	Liaison	Compos.	Mouvement	Vitesse	Entrée
1	Pivot1	Rx ( 0.00000...	Uniforme	50.000000	
2	Pivot2	Rx ( 0.00000...	Uniforme	20.000000	
3	Glissière3	Tx ( 0.00000...	Uniforme	-0.025000	

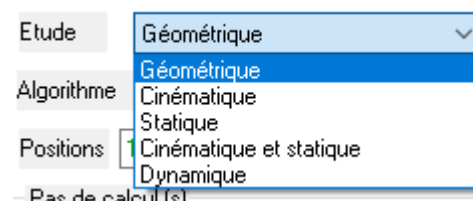
Définir le nombre de positions à 300 et la durée du calcul de 5 sec, après activer l'animation simultanée (permet de vérifier les paramètres du calcul) et lancer le calcul.



### 6.4.2. Etude géométrique

Nous procédons de la même manière en ce qui concerne l'étude géométrique.

Choisir le type d'étude : géométrique



Imposer les valeurs de position finale (en degrés) comme suit :

Pivot 1= 130 deg (angle entre les deux axes formant le contour de trajectoire Plan 01), pivot 2= 50 deg, glissière= -0.1m.

N°	Liaison	Compos.	Mouvement	Pos. Init	Pos. Fin.	Entrée
1	Pivot1	Rx ( 0.00000...	Uniforme	0.000000	130.000000	
2	Pivot2	Rx ( 0.00000...	Uniforme	0.000000	50.000000	
3	Glissière3	Tx ( 0.00000...	Uniforme	0.000000	-0.100000	

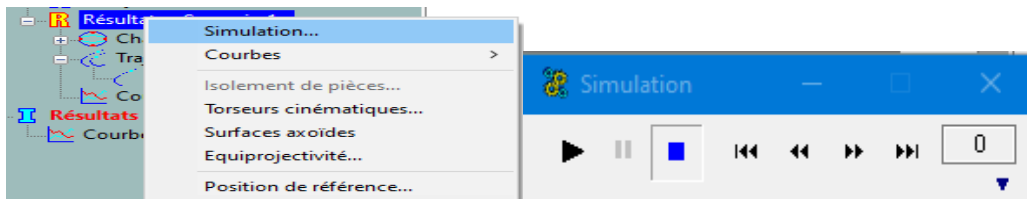
### 6.4.3. Extraction des résultats

Les principaux résultats de cette modélisation sont :

- Une simulation du mouvement, incluant la trajectoire et la vitesse ;
- La trajectoire d'un point ;
- Une courbe simple représentant l'évolution d'une grandeur du mécanisme dans le temps.

#### 6.4.3.1. Simulation

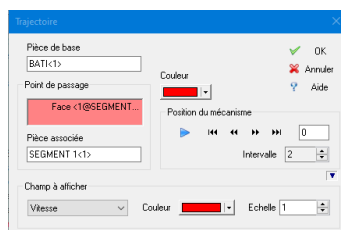
- Cliquer droit sur Résultats / Simulation
- Cliquer sur lecture



#### 6.4.3.2. Définir une trajectoire

Permet le tracé de la trajectoire d'un point d'une pièce et une composante du champ des vitesses ou des accélérations.

- Cliquer droit sur Trajectoires / Ajouter.
- Sélectionnez l'élément à étudier (segment 1, segment 2, effecteur) ainsi que la pièce de référence (le bâti). Dans le champ d'affichage, choisissez la vitesse.



Ici, nous observons les trajectoires de chaque composante du robot SCARA (Figures 4.24, 4.25 et 4.26).

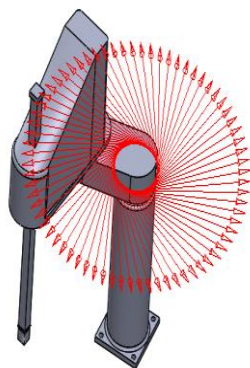


Figure 4.24 : Trajectoire d'un point\segment 1

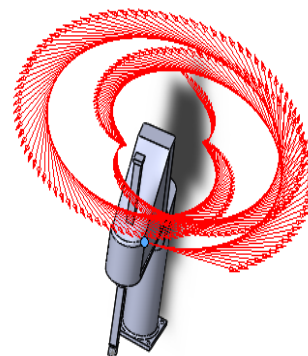


Figure 4.25 : Trajectoire d'un point\segment 2



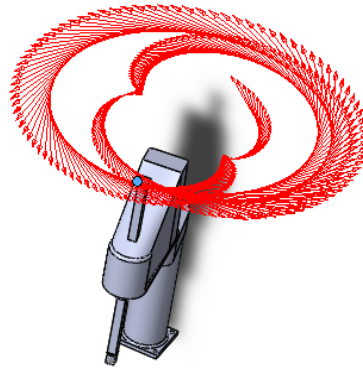
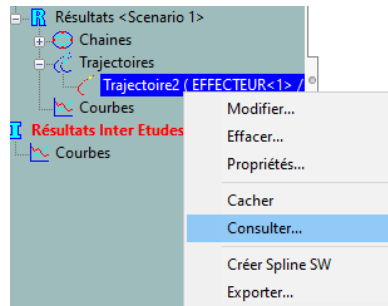


Figure 4.26 : Trajectoire d'un point\ effecteur

Parmi les points forts de MECA3D, c'est qu'il nous permet de consulter les résultats tout en enregistrant les valeurs de position, vitesse et accélération du point de la trajectoire.

- Cliquer droit sur la trajectoire d'un point appartenant à l'effecteur (comme exemple) et sélectionner « Consulter ».



Un tableau s'affiche :

Consultation de trajectoire

Nom: Trajectoire7 Position de ( 16.84,350.75,820.89 mm ) appartenant à EFFECTEUR<1>

Valeurs

Trajectoire  Vitesse  Accélération  Accélération normale  Accélération tangentielle

No	Temps(s)	Gx(m)	Gy(m)	Gz(m)	Norme(m)
000	0.000000e+000	1.683830e-002	3.507504e-001	8.208913e-001	8.928449e-001
001	1.666667e-002	-5.804801e-003	3.468438e-001	8.204747e-001	8.907935e-001
002	3.333333e-002	-2.809510e-002	3.414115e-001	8.200580e-001	8.887330e-001
003	5.000000e-002	-4.992350e-002	3.344855e-001	8.196413e-001	8.866706e-001
004	6.666667e-002	-7.118389e-002	3.261062e-001	8.192247e-001	8.846137e-001
005	8.333333e-002	-9.177370e-002	3.163217e-001	8.188080e-001	8.825692e-001
006	1.000000e-001	-1.115946e-001	3.051881e-001	8.183913e-001	8.805439e-001

< > Courbes... Sortie Aide

Le bouton Courbes du tableau affiche les données du tableau sous forme de courbes. Les Données peuvent être enregistrées dans un fichier texte, Nous prenons comme exemple la vitesse d'un point de l'effecteur du robot SCARA.

Dans cet exemple (figure 4.27), nous observons la vitesse de ce point (en mm/s) sur l'axe X. il est possible également de visualiser les autres composantes de la vitesse (axes Y et Z) ainsi que leur norme.

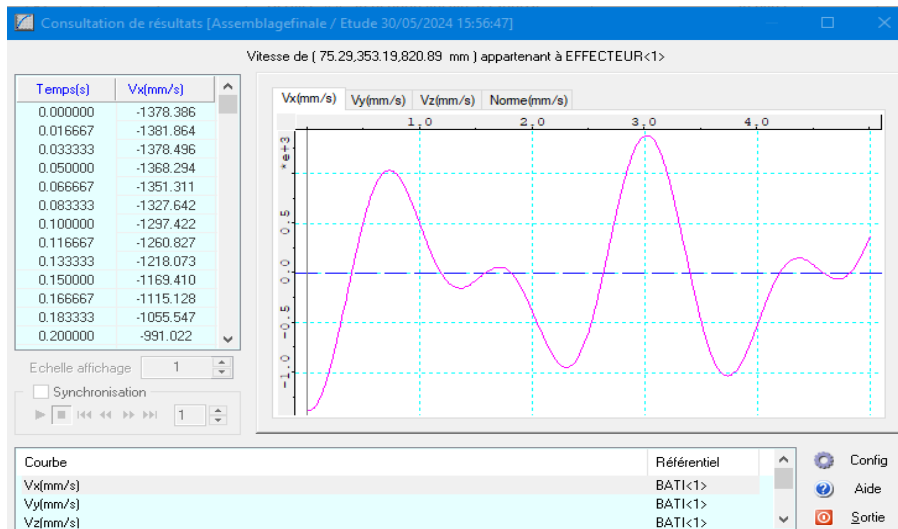


Figure 4.27 : Exemple de résultats obtenu par MECA3D (vitesses d'un point appartenant à l'effecteur)

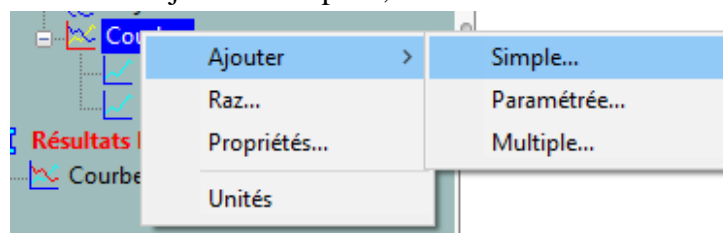
### 6.4.3. 3. Définition des courbes

Trois types de courbes sont disponibles :

- Courbes simples pour afficher la variation d'un paramètre unique en fonction du temps
- Courbes multiples pour superposer l'évolution de plusieurs paramètres en fonction du temps
- Courbes paramétrées pour visualiser la variation d'un paramètre en fonction d'un autre paramètre

Nous présentons dans cette étude uniquement les courbes simples, mais les mêmes principes s'appliquent également aux courbes multiples et paramétrées.

- Cliquer droit sur Courbes / Ajouter / Simples ;



## Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D

- Cliquez sur un des onglets Pièces, Liaisons ou Efforts..., pour choisir le type de l'objet dont nous souhaitons consulter les résultats  
Sélectionnez le type de résultat parmi :

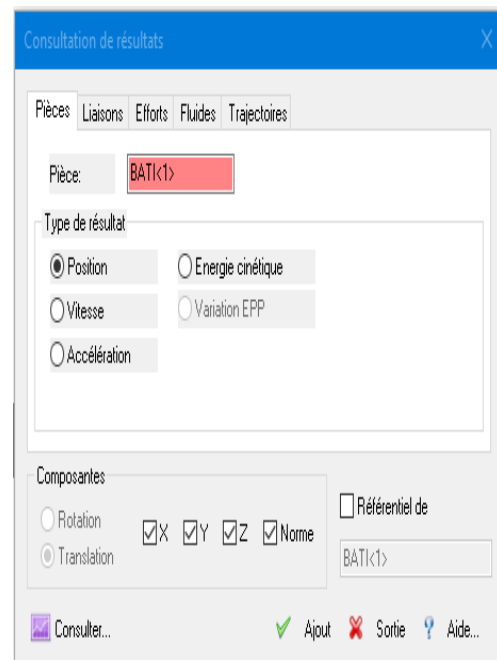
- Position, vitesse ou accélération pour une pièce
- Position, vitesse, accélération, position du centre, effort de liaison dans le repère global ou effort de liaison dans le repère local pour une liaison
- Choix unique pour un effort extérieur

-Sélectionnez le type de composant :

- Composante en translation
- Composante en rotation

- Cliquez Consulter pour accéder à l'afficheur des courbes.

- La pièce de référence par défaut est le bâti.



### 6.4.3.4. Exemples de paramètres cinématiques trouvés par MECA3D

Avec l'aide précieuse de MECA3D, nous avons pu explorer en profondeur les caractéristiques cinématiques du robot SCARA. Nous avons extrait les résultats essentiels concernant les vitesses, les accélérations et les positions des composants mobiles et des différentes liaisons.

#### 6.4.3.4.1. Courbes de Vitesse de Chaque composante mobile

On présente sur les figures (4.28, 4.29 et 4.30), les graphes de vitesse (en mm/s) d'un point de chaque composante mobile (segment 1, segment 2 et effecteur). Ces graphes illustrent comment la vitesse de chaque composante évolue au fil du temps, fournissant des données précieuses pour le comportement cinématique du robot.

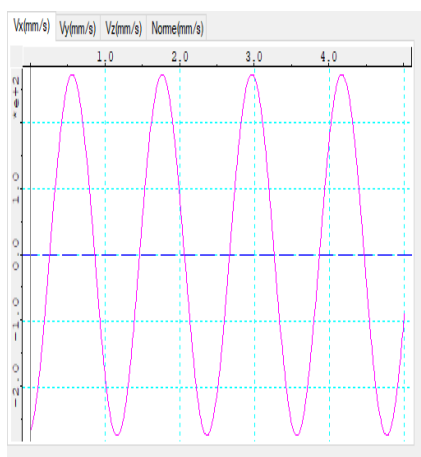


Figure 4.28 : Vitesse angulaire de segment 1

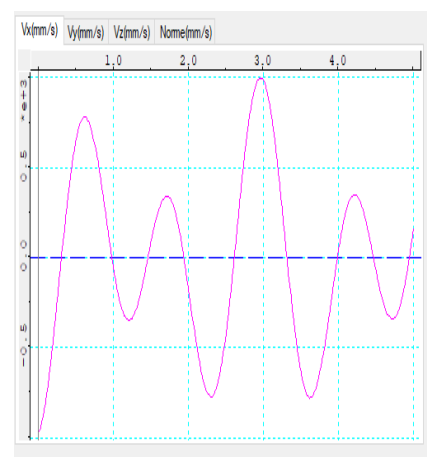


Figure 4.29 : Vitesse angulaire de segment 2

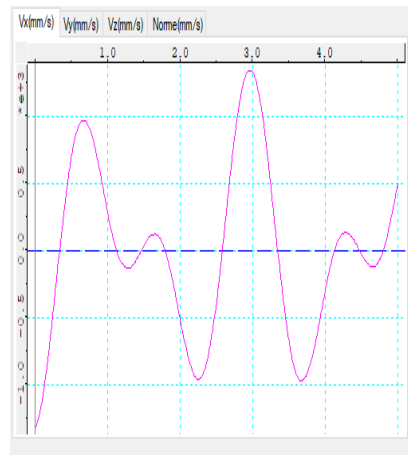


Figure 4. 30 : Vitesse de l'effecteur

#### 6.4.3.4.2. Courbes d'accélération de Chaque composante mobile

Les figures (4.31), (4.32) et (4.33) représentent, également, les courbes de variations de l'accélération (en  $\text{mm/s}^2$ ) d'un point de chaque composante mobile (segment 1, segment 2 et effecteur). Ces graphes permettent de visualiser l'évolution de l'accélération au fil du temps, offrant ainsi des informations cruciales pour comprendre le mouvement le long de l'espace de travail.

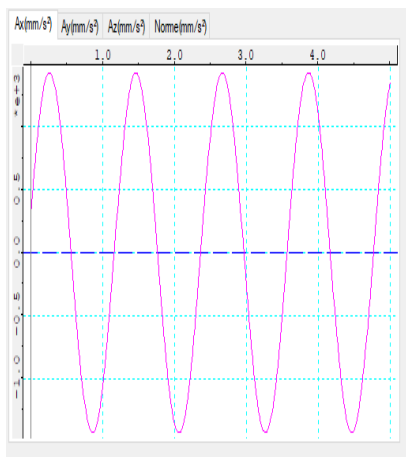


Figure 4.31 : Accélération angulaire de segment 1

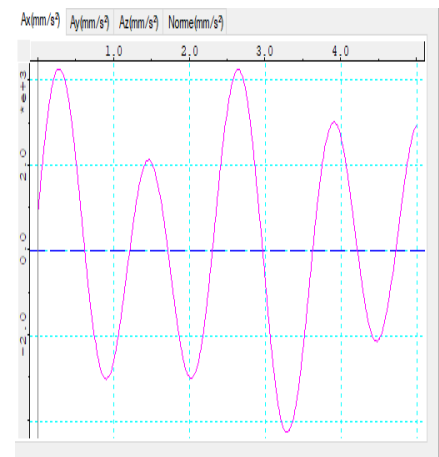


Figure 4-32 : Accélération de segment 2

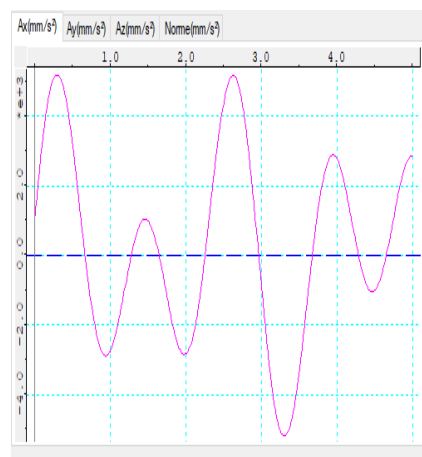


Figure 4.33 : Accélération de l'effecteur

#### 6.4.3.4.3. Courbes de position de chaque composante mobile

Les figures (4.34), (4.35) et (4.36) illustrent respectivement les positions précises (en mm/s) des segments et de l'effecteur du robot SCARA au fil du temps. Ces graphes offrent ainsi une compréhension claire de la cinématique du robot. En observant ces positions, on peut déduire les trajectoires suivies et analyser les performances des segments et de l'effecteur.

Cette représentation graphique permet de vérifier et de maîtriser le champ d'évolution du robot SCARA (espace de travail).

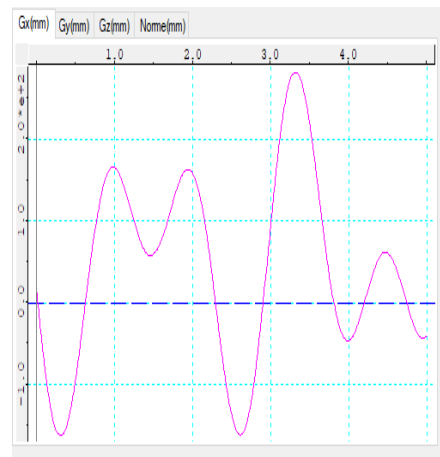
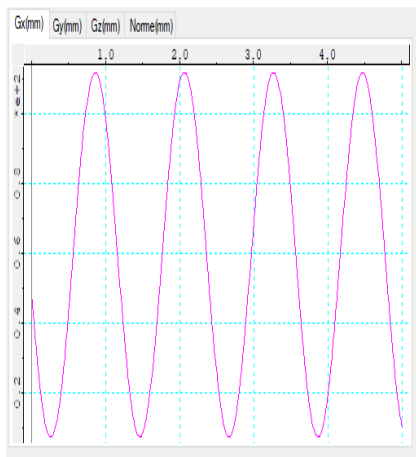


Figure 4.34 : Courbe de position segment 1      Figure 4.35 : courbe de position segment 2

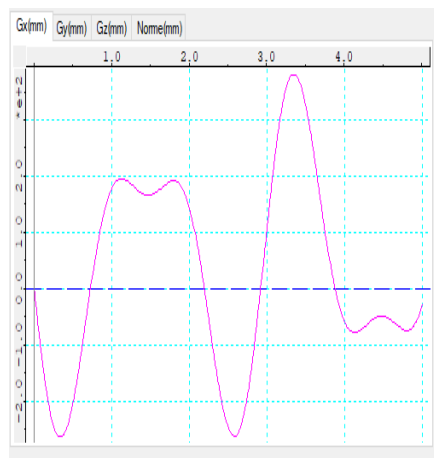
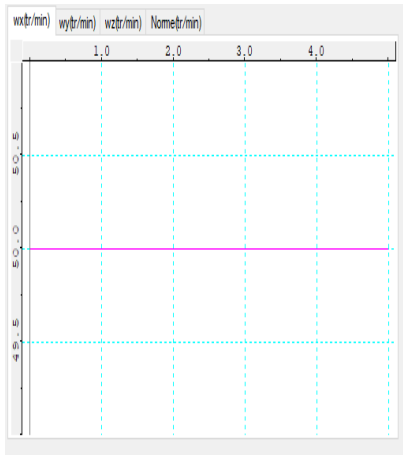


Figure 4.36 : Courbe de position d'effecteur

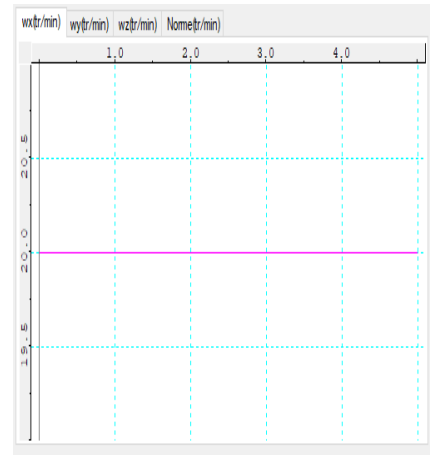
#### 6.4.3.4.4. Courbes de vitesse des liaisons (paramètres introduits lors de l'étude cinématique)

Les figures (4.37), (4.38) et (4.39) représentent les vitesses des liaisons : en tr/min du pivot 1 et du pivot 2, et en mm/s pour la liaison glissière 3. Les liaisons pivots permettent une rotation autour d'un axe fixe (bâti), tandis que la liaison glissière permet un mouvement rectiligne le long d'une trajectoire définie par la contrainte. Les courbes de vitesses montrent clairement qu'il s'agit vraiment des valeurs que nous avons introduites dans le simulateur pour faire l'étude cinématique.

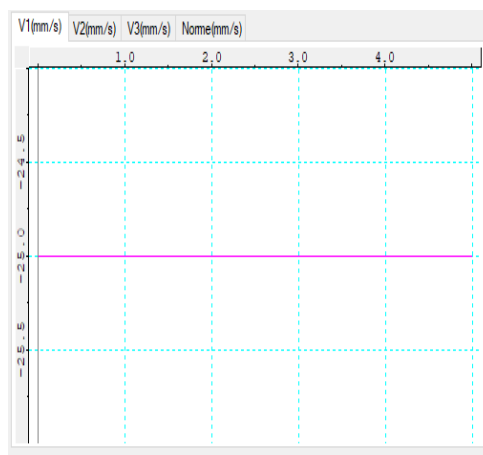
**Chapitre 4 : Conception et analyse cinématique du robot SCARA sous SolidWorks et ses compléments Motion et MECA3D**



**Figure 4.37 : Vitesse de rotation pivot 1**



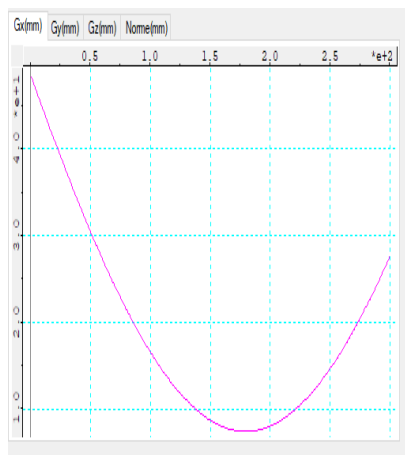
**Figure 4.38 : Vitesse de rotation pivot 2**



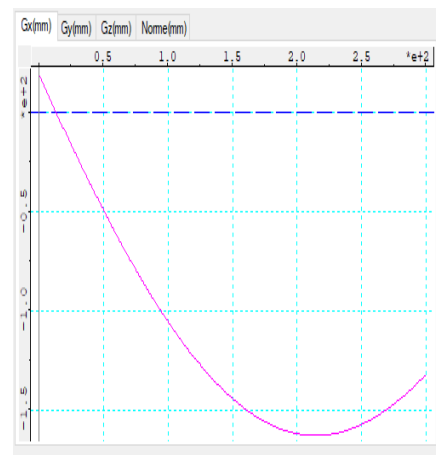
**Figure 4.39 : Vitesse de liaison glissière 3**

**6.4.3.4.5. Exemples de paramètres géométriques trouvés par MECA3D :**

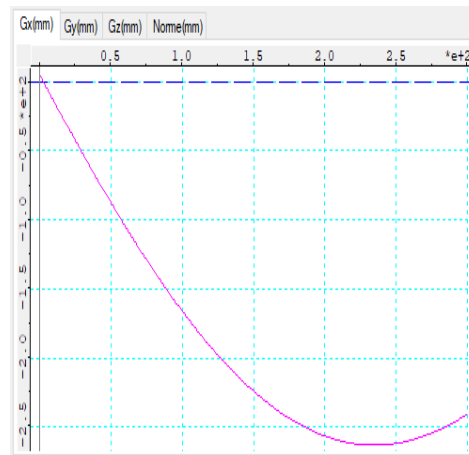
Les figures (4.40), (4.41) et (4.42) montrent, à titre indicatif, les positions précises (en mm) des deux segments et de l'effecteur du robot SCARA. Dans l'étude géométrique, ces graphes permettent de visualiser les trajectoires exactes empruntées par chaque composante. En observant ces positions, on peut mieux comprendre les mouvements du robot SCARA.



**Figure 4.40 : Courbe de position segment 1**



**Figure 4.41 : Courbe de position segment 2**



**Figure 4.42 : Courbe de position de l'effecteur**

## **7. Conclusion du chapitre**

Le développement et l'évolution des logiciels de conception en ingénierie a beaucoup réduit et surmonté l'ensemble des difficultés rencontré lors de l'étude des mécanismes et à leurs tête les systèmes à chaîne ouverte (cas du robot SCARA). A cet effet, nous avons consacré cette partie du travail à la conception assistée par ordinateur, par le moyen de SolidWorks, du robot SCARA sur lequel une étude cinématique et géométrique a été faite tout en utilisant deux de ces compléments à savoir Motion et MECA3D.

Ainsi, l'utilisation de SolidWorks, dans le volet cinématique, nous a permis à trouver l'ensemble des paramètres cinématiques des éléments obéissant à la loi entrée-sortie et cela après avoir établi la contrainte de trajectoire définissant l'espace de travail de l'organe exécutif. Au moyen de SolidWorks Motion & SolidWorks Simulation il est possible de trouver les différents paramètres cinématiques et dynamique tout en définissant la catégorie de résultats à calculer par exemple dans la catégorie des déplacements/Vitesse/Accélération il est possible de trouver les quantités cinématiques suivantes : Tracé de trajectoire, position du centre de gravité de n'importe quel élément, déplacement, vitesse et accélération linéaires ainsi les différents paramètres cinématiques angulaires.

Dans une seconde partie de ce chapitre, nous avons utilisé **MECA3D**, un logiciel d'ingénierie avancé (complément de SolidWorks), comme un outil puissant pour l'étude cinématique du robot et cela sans passer par l'élaboration des contraintes de trajectoire. L'optimisation du nombre de liaisons du mécanisme nous a permis d'aboutir à un système cinématiquement équivalent à un système isostatique et dont la résolution des équations que ce soit cinématique ou statique est devenue très facile (chose qui a été faite par simple clics au moyen de MECA3D. Ce dernier nous a offert une plateforme complète pour simuler et analyser le fonctionnement complexe du robot.

En modélisant chaque'un des composants et leurs interactions, nous avons pu acquérir des informations précieuses sur le comportement surtout cinématique (cas de notre étude).

Cette dernière conclusion confirme le choix de **MECA3D** dans l'étude cinématique des différents systèmes mécanique en se basant sur une optimisation rationnelle des liaisons mécaniques que ce soit élémentaires ou équivalentes.

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude a exploré en profondeur la modélisation mathématique (géométrique et cinématique) et la conception sous SolidWorks d'un robot SCARA à 4 axes. Nous avons démontré les étapes essentielles pour sa conception et son optimisation.

Nous avons commencé par des généralités sur la robotique et établi une base théorique solide en explorant les concepts de modélisation géométrique, cinématique et dynamique des robots. Ces modèles permettent de programmer et de contrôler le robot. La phase suivante du travail s'est concentrée sur la modélisation géométrique et cinématique (directe et inverse) du robot SCARA à 4 axes (MITSUBISHI RH-6SDH35xx), en appliquant ces théories à travers la modélisation et en développant un programme de simulation sous Matlab (Peter Corke toolbox) pour décrire le modèle géométrique direct du robot. Cette simulation permet de définir en temps réel la position de l'organe terminal sans avoir recours aux longs calculs du modèle géométrique. Une modélisation cinématique directe et inverse a également été réalisée afin de définir les vitesses linéaires et angulaires de l'organe terminal.

Ensuite, nous avons utilisé des outils avancés de CAO, notamment SolidWorks et Meca3D, pour concevoir et simuler le robot SCARA, analyser son comportement, extraire les résultats et vérifier sa performance dans divers scénarios. Au moyen de SolidWorks Motion & SolidWorks Simulation il est possible de trouver les différents paramètres cinématiques et dynamiques tout en définissant la catégorie de résultats à calculer. L'utilisation du logiciel Meca3D offre une plateforme complète pour simuler et analyser le fonctionnement complexe du robot.

Enfin, ce projet représente une étape importante dans notre compréhension et notre capacité à concevoir des robots sophistiqués. Les compétences et les connaissances acquises ici seront cruciales pour les futurs développements dans le domaine de la robotique, contribuant à l'innovation technologique et à l'amélioration continue des processus industriels.



## Références bibliographiques

- [1] DJEDDOU, MA, & TOUATI, AR. Conception et analyse d'un robot SCARA. Mémoire de Master, Université Yahia Fares de Medea. 2019.
- [2] HAMDI, H. Introduction à la robotique. Les éditions de l'Université Mentouri Constantine.2002\2003.
- [3] DJEBALA, A. Cours SMA & Robotique, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2024.
- [4] DJOUDI, A. Analyse des structures et méthodes de calcul de la portée d'un robot. Mémoire de master. Université de Biskra. Juin 2017
- [5] DJAOUTI, S. et GUEDOUAR, N. Modélisation et commande à retard temporel d'un robot industriel de type SCARA. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri. 2017.
- [6] SAADI, R. et SALHI, N. Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un PC. Thèse de maîtrise. Université Mohamed Khider Biskra. 2010.
- [7] KASMI, H. et BRIK, Y. Modélisation géométrique d'un bras manipulateur de type SCARA. Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun-Tiaret 2016
- [8] [https://www.delta-robotique.fr/cbx/s4\\_cat392.htm](https://www.delta-robotique.fr/cbx/s4_cat392.htm)
- [9]<https://blog.universal-robots.com/fr/la-robotique-collaborative-integre-les-industries-agroalimentaires>
- [10] <https://biotech-spain.com/en/articles/global-r-d-trends-in-surgical-robotics/>
- [11] <https://www.7x7.press/7-robots-au-service-des-humains>
- [12] <https://www.robot-magazine.fr/lavenir-de-la-robotique-et-des-systemes-automatisees/>
- [13] TAPIA, J. G. Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 2016.
- [14] CHAAL, M. Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte. Thèse de doctorat. universite kasdi merbah ouargla. 2013.
- [15] KHALIL, W. et DOMBRE, E. Bases de la modélisation et de la commande des robots-manipulateurs de type série. Ecole Centrale de Nantes et Université Montpellier, 2012, vol. 2.
- [16] BOUHLAGHEM, A.M. Modélisation et commande d'un robot manipulateur à six degrés de liberté. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba.2015\2016.
- [17] <https://automaticaddison.com/the-ultimate-guide-to-inverse-kinematics-for-6dof-robot-arms/>
- [18] NAOUA, N.A., DIOUANE, M., GUEHEF, H. et HAMIDI, O. Analyse cinématique pour manipulateurs SCARA à 4 d.d.l. Mémoire de master. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.2021\2022.

## Références bibliographique

[19] <https://polaridad.es/fr/configuracion-scara-de-un-robot/#heading-2>

[20] <https://www.fanuc.eu/be/fr/robots/page-de-filtre-des-robots/scara-series/selection-support>

[21] <https://robodk.com/blog/scara-robot/>

[22] FROMENTEZE, T. Introduction à la robotique industrielle. Institut universitaire de technologie du limousin.

[23] [rh-3sdhr\\_standard\\_specifications.pdf](#)

[24] GASMI, M. A. et DJABRI, H. Étude mécanique d'une scie sauteuse sous SolidWorks Motion et MECA3D. Université 8 Mai 1945 Guelma. Mémoire de master. 2023.

[25] ARZAZI, W. Conception et étude d'un moule de thermoformage sous SolidWorks : Etude de cas. Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen. 2019.

[26] Initiation Meca3D SolidWorks page 1 B. LEDU – Lycée Yves THÉPOT – QUIMPER. 2002-2003.

# **ANNEXES**

2.4 Outside dimensions ▪ Operating range diagram

2.4.1 Outside dimensions ▪ Operating range diagram (RH-6SDH series)

(1) Standard Specification

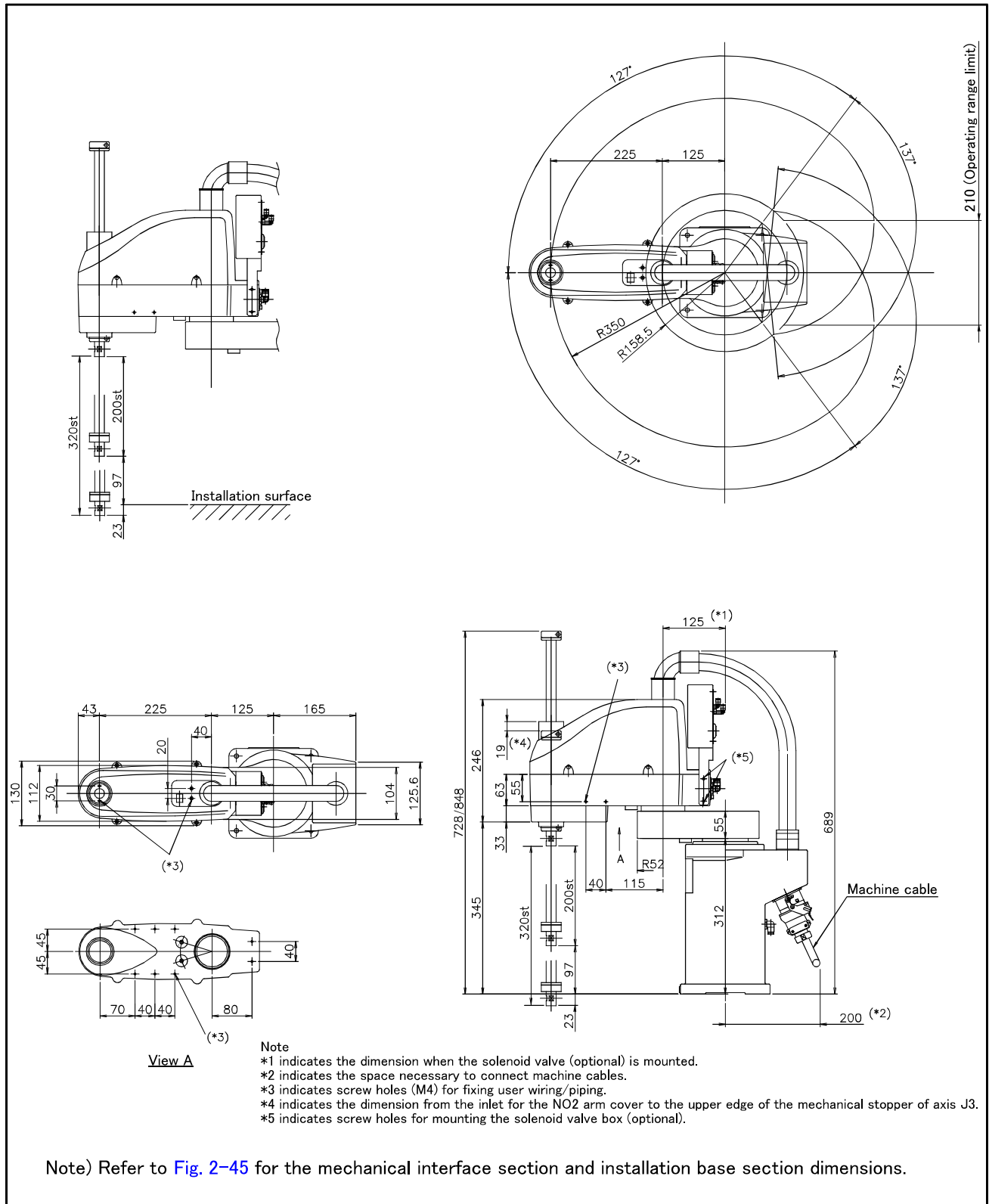


Fig.2-17 : Outside dimensions, Operating range diagram of RH-6SDH35xx

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

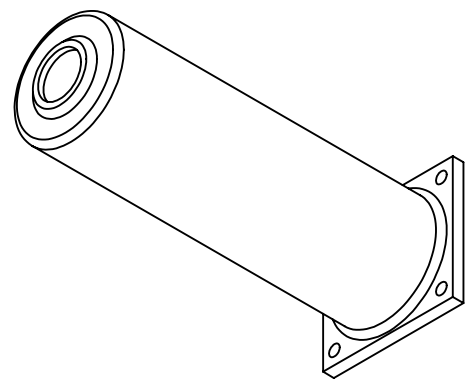
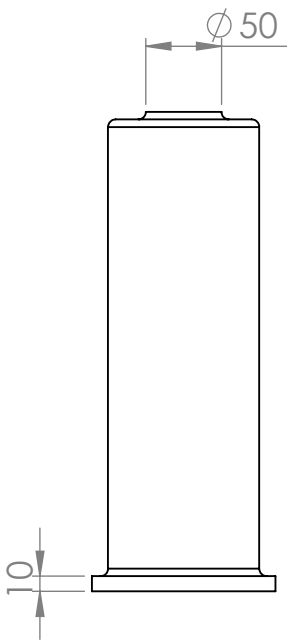
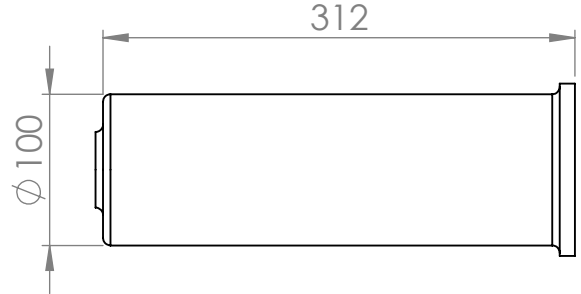
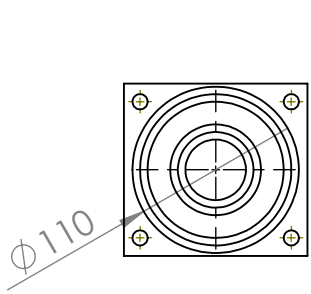
C

B

B

A

A



SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES  
ETAT DE SURFACE:  
TOLERANCES:  
LINEAIRES:  
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

NOM

DATE

TITRE:

AUTEUR

Bourbouna Madjed

10/06/2024

Bati

VERIF.

APPR.

FAB.

QUAL.

MATERIAU:

No. DE PLAN

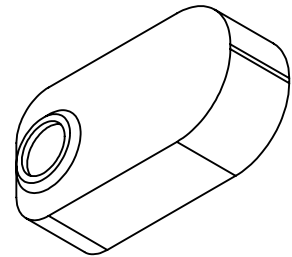
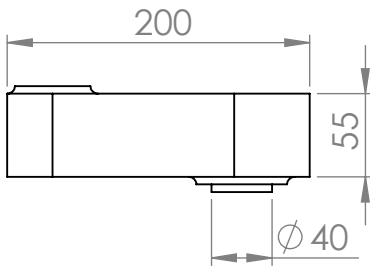
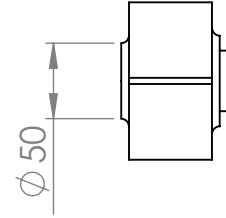
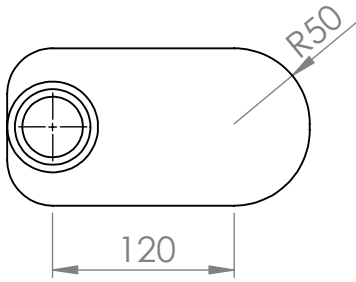
A4

MASSE:

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES  
ETAT DE SURFACE:  
TOLERANCES:  
LINEAIRES:  
ANGULAIRES:

FINITION:

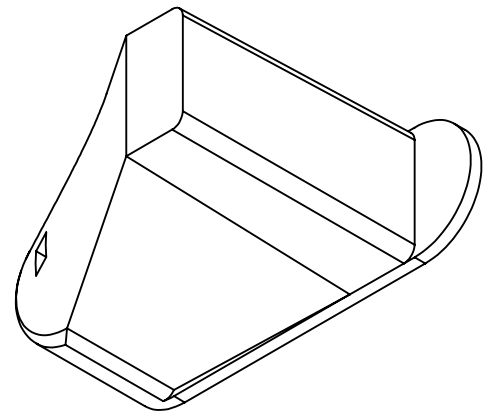
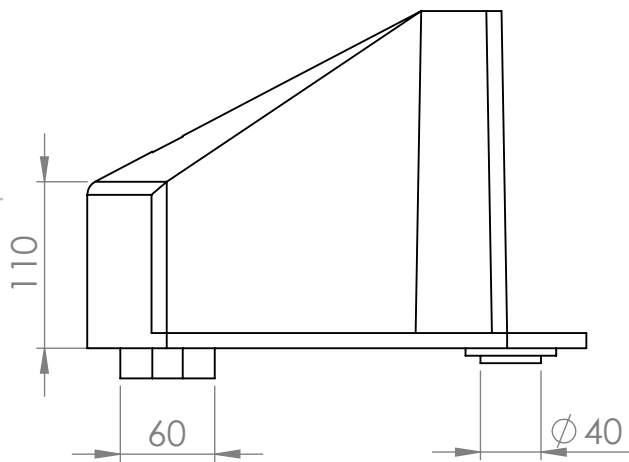
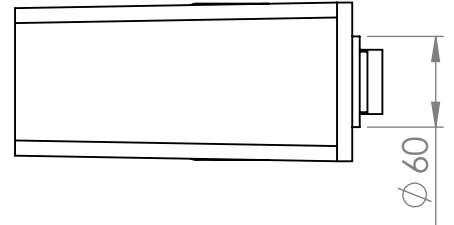
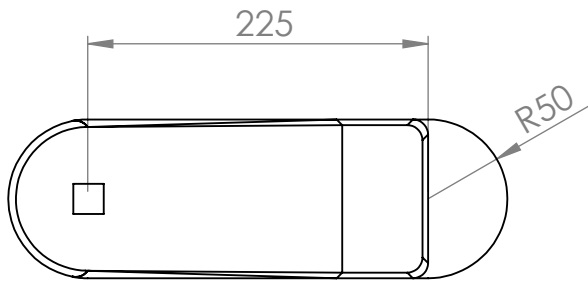
CASSER LES  
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	DATE		
AUTEUR	Bourbouna Madjed	10/06/2024		
VERIF.				
APPR.				
FAB.				
QUAL.		MATERIAU:		No. DE PLAN
		MASSE:		

TITRE:	
<h1>Segment 1</h1>	
No. DE PLAN	A4
ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES  
ETAT DE SURFACE:  
TOLERANCES:  
LINEAIRES:  
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES  
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	DATE	
AUTEUR	Bourbouna Madjed	10/06/2024	
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

MATERIAU:

TITRE:

Segment 2

No. DE PLAN

A4

MASSE:

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1





4 3 2 1

F

F

E

E

D

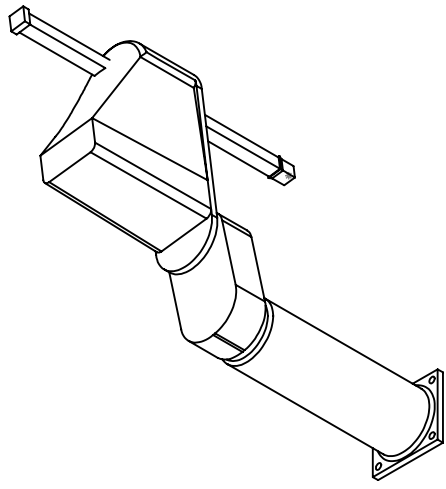
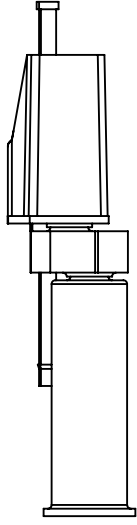
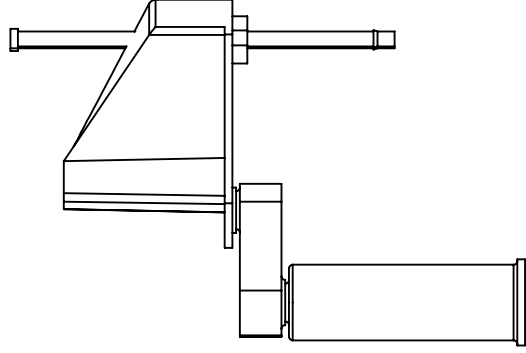
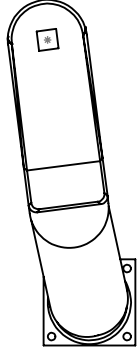
D

C

C

B

B



SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
 LES COTES SONT EN MILLIMETRES  
 ETAT DE SURFACE:  
 TOLERANCES:  
 LINEAIRES:  
 ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	DATE	
AUTEUR	Bourouna Madjed	10/06/2024	
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.		MATERIAU:	
		MASSE:	

TITRE:	Assemblage d'un robot scara
No. DE PLAN	
ECHELLE:1:10	
FEUILLE 1 SUR 1	

A4

4 3 2 1

A

A