

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHES  
SIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie  
Département Génie Mécanique

**Mémoire de Master**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière: Electromécanique**

**Spécialité: Mécatronique**

**Arrêté Ministériel 1275**

**THEME**

**Etude Et Conception D'un Bras Manipulateur De  
Soudage Coffre-fort**

**Présenté par:**

- **AMROUCHE** Housseem Eddine
- **ROUIDJALI** Abderrahmane

**Promoteur:**

**Dr. Ikkache**

**Promotion 2023-2024**



## *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord "Allah " le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la patience afin d'arriver à la finalité de ce parcours.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur **Dr. IKKACHE. K** qui a bien fourni des efforts pour nous à donner toutes les informations, nous à profiter de son savoir et ses précieux conseils.*

*Nous tenons à remercier l'équipe de personnel de l'entreprise **SOFICLEF**, en particulier le chef de la production Monsieur **A. BOUBNIA**, et Monsieur **H. GASSEM**, pour leur accueil chaleureux, leurs conseils avisés et leur précieuse assistance durant notre stage.*

*Nous tenons à remercier également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À celui qui a sacrifié son temps et sa santé pour nous, mon cher père qui a tout fait pour nous, j'espère t'avoir rendu fier ;*

*À ma chère mère, sans ses sacrifices et ses prières, je ne serais pas ici. Écrire 100 pages ne suffirait pas pour exprimer ma reconnaissance et ma gratitude. Que Dieu te bénisse ;*

*À mes frères et sœurs, qui ont joué un rôle important dans ma vie, je souhaite tout le bonheur et le succès dans leur vie ;*

*À mes amis qui ont partagé ce voyage avec nous, je vous souhaite tout le meilleur ;*

*À moi-même, je veux me remercier d'avoir accepté les défis et d'être allé jusqu'au bout ;*

*À tous qui a participé à la réussite de ce modeste travail de près ou de loin ;*

*Rouidjali Abderrahmane*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À mon père, pour les efforts considérables et les sacrifices que tu as faits pour nous offrir les meilleures opportunités.*

*À ma mère, pour ton amour incommensurable, tes prières sincères, et ton soutien indéfectible. Ta patience et tes encouragements m'ont donné la force de continuer rien que pour te rendre fière.*

*À mes sœurs, pour votre présence constante et votre aide précieuse. Vos sourires et votre soutien m'ont toujours réconforté et motivé.*

*À mes amis, pour leur accompagnement fidèle tout au long de cette aventure. Votre amitié spéciale, vos conseils avisés et vos encouragements m'ont aidé à surmonter les défis et à célébrer les réussites.*

*À moi-même, pour le courage et la patience déployés dans la réalisation de ce projet. Ce mémoire est le résultat de nombreuses heures de travail acharné, de persévérance et de passion pour l'électromécanique.*

*À tous ceux qui m'ont aidé un jour même avec un sourire durant mes moments difficiles.*

*Amrouche Housseem-Eddine*

## ملخص:

هذا العمل يتضمن تصميم وتحكم في الروبوت الصناعي، و هو روبوت لحام صناعي بثلاث درجات حرية.

يتكون هذا المشروع من جزئين أساسيين:

الجزء الأول يعتمد على تصميم ونمذجة الهيكل الميكانيكي ومحركات الروبوت.

الجزء الثاني مخصص للتحكم والخدمة باستخدام برنامج MATLAB

الكلمات المفتاحية: روبوت، محاكاة، تحكم، ذراع الية، روبوت صناعي، لحام، محركات التيار المستمر، الملتقطات.

## Résumé

Ce travail implique la conception et la commande d'un robot industriel, en l'occurrence un robot de soudage industriel à trois degrés de liberté.

Ce projet se compose de deux parties principales :

La première partie se concentre sur la conception et la modélisation de la structure mécanique et des actionneurs du robot.

La deuxième partie est dédiée à la commande et à l'asservissement à l'aide d'un logiciel MATLAB.

**Mots-clés :** robot, simulation, commande, bras manipulateur, robot industriel, soudage, moteurs à courant continu, capteurs

## Abstract:

This work involves the design and control of an industrial robot, specifically an industrial welding robot with three degrees of freedom.

The project consists of two main parts:

The first part focuses on the design and modeling of the mechanical structure and the actuators of the robot.

The second part is dedicated to control and servoing using **MATLAB** software.

**Keywords:** robot, simulation, control, robotic arm, industrial robot, welding, DC motors, sensor.

# Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>I</b>
<b>Dédicace.....</b>	<b>II</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>IX</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Liste des abéviations.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>

## **Chapitre I : Présentation de l'entreprise**

I.1	Introduction .....	3
I.2	Domaine d'activité de SOFICLEF .....	3
I.3	Historique .....	3
I.4	Base Logistique .....	9
I.5	Opérateur Economique Agrée .....	9
I.6	Certification ISO 9001:2015 .....	9
I.7	Conclusion.....	10

## **Chapitre II : Généralité sur la fabrication mécanique**

II.1	Introduction .....	11
II.2	Généralités sur les procédés de fabrication .....	11
II.3	Obtention par enlèvement de matière .....	11
II.3.1	<i>Fraisage</i> .....	11
II.3.2	<i>Découpages</i> .....	12
II.3.2.1	Types de découpages .....	12
II.4	Obtention par fusion .....	13
II.4.1	<i>Frittage</i> .....	13
II.4.2	<i>Moulage</i> .....	13
II.5	Obtention par déformation.....	14
II.5.1	<i>Emboutissage</i> .....	14
II.5.2	<i>Cintrage</i> .....	15
II.5.3	<i>Pliage</i> .....	15

II.5.3.1	Types de pliage.....	16
-	Pliage en V .....	16
-	Pliage par cambrage en U.....	16
II.6	Obtention par assemblage :.....	16
II.6.1	Notion générale sur le soudage .....	17
II.6.2	Historique du soudage.....	17
II.6.3	Définition .....	17
II.6.4	Conception d'assemblage soudé.....	18
II.6.4.1	Assemblage bout à bout.....	18
II.6.4.2	Assemblage en angle .....	18
II.6.4.3	Assemblage en T .....	19
II.6.4.4	Assemblage à recouvrement.....	19
II.6.5	Déférent types de soudage.....	20
II.6.5.1	Soudage à l'arc .....	20
II.6.5.2	Soudure TIG.....	21
II.6.5.3	Soudure MIG/MAG.....	21
II.6.5.4	Soudure au chalumeau.....	22
II.6.5.5	Soudure laser .....	22
II.6.5.6	Soudage par résistance .....	23
II.6.6	Risques liés aux soudages .....	23
II.7	Conclusion .....	24

### **Chapitre III : Généralités sur les robots**

III.1	Introduction.....	25
III.2	Définition d'un robot .....	25
III.3	Historique.....	26
III.4	Classifications .....	27
III.4.1	<i>Les Télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle</i> .....	27
III.4.2	<i>Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés</i> .....	27
III.4.3	<i>Les robots programmables</i> .....	27
III.4.4	<i>Les robots dits "intelligents"</i> .....	28
III.4.4.1	Définition du robot industriel .....	28
III.5	Constitution d'un Robot .....	29
III.5.1	<i>Système mécanique articulé (SMA)</i> .....	29
III.5.1.1	Degrés de libertés .....	30
III.5.1.2	Types des articulations .....	30

a)	Articulation rotoïde .....	30
b)	Articulation prismatique.....	31
III.5.1.3	Organe terminal.....	31
III.5.2	Actionneurs.....	31
III.5.3	Capteurs .....	32
III.5.3.1	Types des capteurs.....	32
a)	Capteurs de distance.....	33
b)	Capteurs de mouvement .....	33
c)	Capteurs de température.....	33
d)	Capteurs de position et d'orientation .....	34
III.5.4	Partie commande.....	34
III.6	Domain d'utilisation des robots .....	35
III.6.1	Assemblage.....	35
III.6.2	Peinture .....	35
III.6.3	Soudage .....	36
III.7	Conclusion .....	37

## **Chapitre IV : Modélisation et commande de robot**

IV.1	Introduction.....	38
IV.2	Problématique .....	38
IV.3	Objectifs .....	38
IV.4	Hypothèse .....	38
IV.5	Modélisation de robot .....	39
IV.5.1	Modélisation géométrique.....	39
IV.5.1.1	Modèle géométrique directe (MGD).....	39
IV.5.1.2	Modèle géométrique inverse (MGI).....	42
IV.5.2	Modélisation cinématique .....	45
IV.5.2.1	Modèle cinématique direct (MCD).....	45
IV.5.2.2	Modèle cinématique inverse (MCI).....	51
IV.6	Conception de Robot.....	51
IV.6.1	Conception de Réducteurs.....	51
IV.6.2	Base .....	57
IV.6.3	Articulations.....	57
IV.6.4	Les Bras.....	58
IV.6.5	Torche de soudage .....	59

IV.6.6	<i>Assemblage du Robot</i> .....	59
IV.7	Simulation du Robot .....	61
IV.7.1	<i>Modélisation de moteur à courant continu</i> .....	63
IV.7.1.1	Constituant d'un moteur à courant continu .....	63
IV.7.2	<i>Commande de Moteur CC</i> .....	67
IV.7.2.1	Commande on boucle ouverte .....	67
IV.7.2.2	Commande on Boucle fermée .....	68
IV.7.3	<i>Correcteur PID</i> .....	68
IV.7.3.1	Rôle du correcteur .....	69
IV.7.3.2	Choix de correcteur .....	70
IV.7.3.3	Calcule des paramètres de correcteur PI.....	71
IV.7.4	<i>Modélisation de MGI</i> .....	74
IV.7.5	<i>Définition de trajectoire</i> .....	74
IV.7.6	<i>Visualisation des scopes de position</i> .....	77
IV.8	Conclusion .....	78
	<b>Conclusion générale</b> .....	<b>79</b>
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>XVII</b>
	<b>Annexes</b> .....	<b>XIX</b>

## Liste des figures

Figure I-1 : Ébauche de clé [1].....	4
Figure I-2 : Logo de JMA[1].....	4
Figure I-3 : Première génération du logo SOFICLEF [1].....	4
Figure I-4: Logo FAAB [1].....	5
Figure I-5: Logo KALE KILIT [1] .....	5
Figure I-6 : Logo AHRAM [1].....	5
Figure I-7 :Poignée [1] .....	6
Figure I-8 : Deuxième génération du logo SOFICLEF [1] .....	6
Figure I-9: L'entreprise SOFICLEF [1] .....	7
Figure I-10 : Logo DEWALT, STANLEY et BLACK&DECKER [1].....	8
Figure I-11: Troisième génération du logo SOFICLEF [1] .....	8
Figure I.I-12: Points De Distribution Dans Les Régions Du Pays[1] .....	9
Figure II-1 : Frisape [3].....	12
Figure II-2 : L'oxycoupage [6] .....	12
Figure II-3 : Découpage plasma [6] .....	12
Figure II-4 : Découpe a fil.....	13
Figure II-5 : Découpage par presse [7].....	13
Figure II-6 : Processus de frittage .....	13
Figure II-7:Moulage en sable [8] .....	14
Figure II-8 : Les différentes phases de l'emboutissage [9] .....	14
Figure II-9: Cintrage d'un Tube Métallique [10] .....	15
Figure II-10 : Pliage de tôle [11].....	15
Figure II-11 : Pliage en V [12] .....	16
Figure II-12 : Pliage en U [12] .....	16
Figure II-13 : Assemblage bout à bout [17] .....	18

Figure II-14 : Assemblage d'angle [16] .....	19
Figure II-15 : Assemblage en T [16] .....	19
Figure II-16 : Types d'assemblage à recouvrement [17] .....	20
Figure II-17 : Soudage à l'arc [16] .....	20
Figure II-18 : Schéma De Transfert Du Métal [18] .....	21
Figure II-19 : Soudure MIG/MAG [18] .....	21
Figure II-20: Soudure au chalumeau [18] .....	22
Figure II-21 : Soudure laser [18] .....	22
Figure II-22: Soudage par résistance [19] .....	23
Figure III-1: Premier robot industriel [25] .....	27
Figure III-2: Types des robots industriels .....	29
Figure III-3: Constitution d'un bras manipulateur .....	29
Figure III-4: Caractéristique d'une Liaison Pivot [26] .....	30
Figure III-5: Caractéristique d'une Liaison Glissière [26] .....	31
Figure III-6: Organe terminal [21] [29] .....	31
Figure III-7: Actionneurs .....	32
Figure III-8: Principe du capteur .....	32
Figure III-9: Capteurs de distance .....	33
Figure III-10: Capteur de mouvement .....	33
Figure III-11: Capteur de température .....	33
Figure III-12: Capteur de position et d'orientation .....	34
Figure III-13: Schéma fonctionnel d'un robot industriel .....	34
Figure III-14: Robots d'assemblage automobile [29] .....	35
Figure III-15: Robot de peinture [28] [29] .....	36
Figure III-16: Robot de soudage [29] .....	36
Figure IV-1 : Paramètres géométriques .....	40

Figure IV-2 : Les repères du Robot.....	40
Figure IV-3 :Caractérisations d'une articulation rotoïde .....	47
Figure IV-4:Composition d'un Réducteur Cycloïdal [30].....	52
Figure IV-5:Fonctionnement d'un Réducteur Cycloïdal [30] .....	52
Figure IV-6:Courbe Épi trochoïdale [30].....	53
Figure IV-7:Équations Paramétriques dans SOLIDWORKS .....	54
Figure IV-8:Disque cycloïdal.....	54
Figure IV-9:Pièces de réducteur cycloïdal .....	55
Figure IV-10:Vue Éclatée de l'Assemblage du Réducteur Cycloïdal .....	55
Figure IV-11:Assemblage Finale .....	56
Figure IV-12:Réducteur cycloïdal.....	56
Figure IV-13:La Base.....	57
Figure IV-14 : Première articulation.....	57
Figure IV-15 : Deuxième articulation.....	57
Figure IV-16 : Premier Bras.....	58
Figure IV-17:Deuxième Bras .....	58
Figure IV-18: Torche de soudage.....	59
Figure IV-19: Vue Éclatée de l'Assemblage du Robot .....	60
Figure IV-20:Assemblage final du Robot .....	60
Figure IV-21: Robot a 3 DDL de Soudage .....	61
Figure IV-22: Coffre-fort .....	61
Figure IV-23:Robot de soudage avec le coffre-fort .....	62
Figure IV-24: Importation du Robot depuis SolidWorks vers MATLAB .....	62
Figure IV-25: Schéma bloc du robot sur MATLAB .....	63
Figure IV-26: Schéma d'intégration des actionneurs et du modèle géométrique inverse .....	63
Figure IV-27: Circuit équivalent de moteur.....	64

Figure IV-28: Schéma bloc de la partie électrique.....	64
Figure IV-29: Schéma bloc de la partie mécanique .....	65
Figure IV-30: Schéma bloc de Moteur CC .....	66
Figure IV-31: Fonction de Transfert de Moteur CC .....	67
Figure IV-32: Commande on boucle ouverte.....	67
Figure IV-33 : Réponse indicielle du système on boucle ouvert .....	67
Figure IV-34 : Commande en boucle fermée.....	68
Figure IV-35 : Réponse indicielle du system on boucle fermée .....	68
Figure IV-36: Schéma bloc d'un contrôleur PID .....	69
Figure IV-37 : Schéma bloc de moteur CC avec un correcteur PI.....	71
Figure IV-38 : Réponse indicielle de MCC avec le correcteur PI pour 3ms .....	73
Figure IV-39 : Schéma bloc de MGI.....	74
Figure IV-40 : Trajectoire désirer .....	74
Figure IV-41 : Point de départ.....	75
Figure IV-42 : Point d'arrivé.....	75
Figure IV-43 : Paramètres de bloc de rotation .....	75
Figure IV-44: Schéma bloc final de simulation du Robot .....	76
Figure IV-45: Courbe de $\theta_1$ .....	77
Figure IV-46: Courbe de $\theta_2$ .....	77
Figure IV-47: Courbe de $\theta_3$ .....	78

## Liste des tableaux

Tableau IV-1: Paramètres géométriques ..... 41

## Liste des abéviations

<b>Cm(t)</b>	Couple moteur.
<b>DDL</b>	Degrés De Libertés.
<b>E</b>	La Force Electromotrice.
<b>FTBF</b>	Fonction de Transfert en Boucle Fermé.
<b>FTBO</b>	Fonction de Transfert en Boucle Ouvert.
<b>MAG</b>	Metal Active Gas.
<b>MCD</b>	Modèle Cinématique Direct.
<b>MCI</b>	Modèle Cinématique Inverse.
<b>MGD</b>	Modèle Géométrique Direct
<b>MGI</b>	Modèle Géométrique inverse.
<b>MIG</b>	Metal Inert Gas.
<b>PID</b>	Proportionnel Intégrale Dérivé.
<b>SMA</b>	Système Mécanique Articulé.
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas.
<b>Tem</b>	Le Couple Electromagnétique.
<b>Tr</b>	Temps de réponse.
<b><math>\epsilon(t)</math></b>	Seuil d'erreur.



## **Introduction Générale**

L'évolution de la technologie a poussé le monde industriel de rentrer en révolution. L'un des phénomènes qui rentre en facteur dans les usines et les entreprises industrielles est l'automatisation de la production. Ce qui consiste à rendre les systèmes de productions de plus en plus intelligents, dont ils peuvent effectuer des tâches assez difficiles et complexes sans l'intervention de l'être humain.

Cette innovation présente des avantages pour l'entreprise et ses ouvriers. Elle permet d'accomplir des tâches répétitives et dangereuses, (soudage, peinture, assemblage...), la production sera plus rapide, précise, et fiable. Ils assurent donc une augmentation de la productivité aussi que la qualité des produits, ce qui influe positivement le coût.

Parmi les technologies utilisées dans les chaînes industrielles automatisées, on peut citer les automates Programmables industriels et les robots manipulateurs. Ces dernières présentent pas mal d'avantages dans le domaine industriel, mais ils nécessitent un bon savoir-faire et une maîtrise de leur diagnostic.

A cet effet, nous avons choisi de se focaliser sur le domaine de la robotique, et plus particulièrement les robots industriels. L'objet de notre projet est donc la conception, la modélisation, et la commande d'un bras manipulateur de soudage à trois degrés de liberté.

Pour mener à bien notre travail, nous avons partagé notre mémoire en quatre chapitres, le premier décrit une présentation de l'entreprise **SOFICLEF**. Puis on rentre directement à l'activité et la base logistique de la Sarl.

Le deuxième chapitre est consacré aux domaines de la fabrication mécanique, Dans ce dernier, nous allons décrire les procédés de fabrication et les méthodes principale de la fabrication mécanique. Ensuite, nous avons consacré une section à parler d'une généralitésur le soudage. Nous avons parlé des types d'assemblage et des différents types de soudage.

Le troisième chapitre est réservé aux généralités sur les robots, dont on commence par une petite définition de la robotique et son historique. Puis on rentre directement à la catégorie des bras manipulateurs, dont on cite leurs constituants, caractéristiques et leurs performances. A la fin, on donne quelques domaines d'application et leurs utilisations.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation, conception, et la simulation de robot. En premier lieu, nous présentons la modélisation géométrique et cinématique de la structure mécanique de notre robot. Ensuite, nous présentons les différentes pièces réalisées par un logiciel de **CAO SOLIDWORKS**. Enfin, nous passons à la simulation et la commande et l'asservissement de notre robot en utilisons logiciel **MATLAB**.

# Chapitre I

## *Présentation de l'entreprise*

## **I.1 Introduction**

Nous avons choisi l'entreprise SOFICLEF comme un lieu de stage pour appliquer nos connaissances théoriques dans le domaine des électromécaniques.

L'entreprise SOFICLEF est spécialisée dans la production et la commercialisation des produits de quincaillerie , outillage et équipements ( de chantir , de jardin , de nettoyae , de protection ..) ,les coffres fort , les plaques d'immatriculation et les portes

Dans ce premier chapitre, on va présenter le dommaine d'activité de l'entreprise SOFICLEF , son historique, sa situation géographique et la norme internationale des standardisation certifiée de cette entreprise.

## **I.2 Domaine d'activité de SOFICLEF**

SOFICLEF est une entreprise à caractère industriel et commercial, leur atout majeur est la maitrise totale des opérations de la grande distribution :

**Production et fabrication :** corps de serrure, poignée de porte, plaque d'immatriculation et brouette.

**Montage et assemblage :** serrure de porte.

**Commercialisation :** SOFICLEF commercialise une gamme variée de produits, notamment de l'outillage électroportatif et des équipements, des outils à main et leurs accessoires, des portes de maison et des ébauches de clés.

## **I.3 Historique**

Tout a commencé le 21 juin 1994, dans un local de 7 m<sup>2</sup> situé au 39, rue Ahmed Boumaazouza, El Madania (ex Salembier), à Alger. La première activité de cet établissement était la fabrication des ébauches de clés.

**1995 :** La distribution des ébauches de clés a commencé dans toute la région d'Alger.



**Figure I-1 : Ébauche de clé [1]**

**1996 :** La distribution des ébauches de clés s'est étendue à l'ensemble du territoire national.

**1997 :** La première importation d'ébauches de clés de la marque JMA en provenance d'Espagne a eu lieu.



**Figure I-2 : Logo de JMA[1]**

**1998 :** La première génération du logo de SOFICLEF a été créée en même temps que la fondation de la Sarl SOFICLEF le 18 février 1998.



**Figure I-3 : Première génération du logo SOFICLEF [1]**

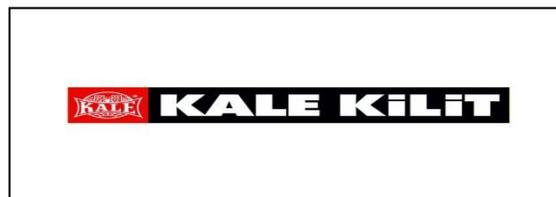
**1999** :SOFICLEF est devenu le distributeur exclusif des plaques d'immatriculation de la marque française FAAB.



**Figure I-4:** Logo FAAB [1]

**2000** : Mise en place du service écoute-clients

**2001** :SOFICLEF est devenu le distributeur exclusif des serrures turques de la marque KALE KILIT.



**Figure I-5:** Logo KALE KILIT [1]

**2002** :SOFICLEF est devenu le distributeur exclusif des serrures égyptiennes de la marque IZO, sous la désignation AHRAM.



**Figure I-6 :** Logo AHRAM [1]

**2003** :Le service après-vente a été mis en place.

**2004** :SOFICLEF a déménagé son siège vers son propre bâtiment de 900m<sup>2</sup> situé à Tixeraine (Alger).

**2005** :Les cadenas et les paumelles ont été introduits dans la gamme de produits de quincaillerie.

**2006** : Mise en place d'une unité locale de montage et assemblage de la poignée.



**Figure I-7** :Poignée [1]

**2007** :SOFICLEF a acquis une ligne de production pour la fabrication des plaques d'immatriculation et des poignées.

**2008 (10<sup>ème</sup> anniversaire)** :La deuxième génération du logo de SOFICLEF a été créée en même temps que son installation dans un nouveau site de 5000m<sup>2</sup> situé à Baba Ali, Alger.



**Figure I-8** : Deuxième génération du logo SOFICLEF [1]

**2009** :La gamme d'outillage électroportatif a été introduite sous la marque SOFICLEF, et l'ouverture d'un showroom de 1800m<sup>2</sup> à Chéraga, Alger, dédié à la vente de portes, a été réalisée.

**2010** :SOFICLEF a déménagé vers un nouveau site de 35 000m<sup>2</sup> situé à Si Mustapha, Boumerdes, et a obtenu une autorisation pour l'exploitation d'un entrepôt sous douane sur ce site.



**Figure I-9:** L'entreprise SOFICLEF [1]

**2011** :La capacité de production des poignées et des crémones a été augmentée.

**2012** :Première exportation de la plaque d'immatriculation vers le Maroc.

**2013** :Une ligne de montage et d'assemblage de serrures a été installée.

**2014** : Réorganisation de toutes les structures de l'entreprise SOFICLEF atteint les 290 collaborateurs.

**2016** :La première exportation de plaques d'immatriculation vers la France.

**2017** :SOFICLEF a obtenu la certification du système de management ISO 9001:2015.

**2018 (20<sup>ème</sup> anniversaire)** : Distributeur officiel des marques américaines DeWalt, Stanley et Black&Decker



**Figure I-10** : Logo DEWALT, STANLEY et BLACK&DECKER [1]

**2019** : SOFICLEF a commencé la production locale de brouettes et a également lancé la troisième génération de son logo.



**Figure I-11**: Troisième génération du logo SOFICLEF [1]

**2022** : Mise en place des distributeurs exclusifs dans les régions du pays



**Figure I-12 : Points De Distribution Dans Les Régions Du Pays[1]**

#### **I.4 Base Logistique**

SOFICLEF se trouve au cœur du développement de la logistique afin de répondre aux exigences de la modernisation organisationnelle SOFICLEF dispose de l'un des plus grands réseaux de distribution en Algérie.

De plus, SOFICLEF bénéficie d'un espace de stockage et de magasinage de sa marchandise de 15 000 m<sup>2</sup>, équipé d'un système de racking (rayonnage) à palettes grande hauteur, garantissant ainsi un flux de marchandises sécurisé.

#### **I.5 Opérateur Economique Agréé**

La maîtrise des procédures de gestion douanière et la conformité à tous les aspects a abouti à l'octroi d'une ligne douanière spécialisée pour leurs transactions douanières.

Le témoignage et la reconnaissance de l'État algérien se sont concrétisés par l'attribution du statut d'opérateur économique agréé à SOFICLEF.

Grâce à ses installations et son organisation, SOFICLEF a pu obtenir l'autorisation de son entrepôt sous douane privé

#### **I.6 Certification ISO 9001:2015**

La Sarl SOFICLEF a démontré son engagement envers la qualité en plaçant celle-ci parmi ses principales préoccupations, en s'engageant dans une démarche d'évaluation continue de l'organisation de toutes ses structures. Le 18 septembre 2017, VINÇOTTE International

Algérie SPA a décerné, après une évaluation minutieuse, la norme de qualité ISO 9001:2015 pour l'ensemble des activités de SOFICLEF.

## **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenter l'entreprise SOFICLEF , nous avons découvert à quelle point cette entreprise a évolué au fil des années pour enrichir le marché algérien et le marché internationale par ces produits de qualité.

Afin de comprendre le domaine de production , nous avons parler dans le prochain chapitre sur les notions de la fabrication mécanique.

# Chapitre II

*Généralité sur la fabrication mécanique*

## II.1 Introduction

La fabrication mécanique est un processus vital dans la création de pièces et de composants utilisés dans une multitude d'industries à travers le monde. Elle consiste à transformer des matériaux bruts en produits finis, en utilisant une combinaison de machines-outils et de techniques d'usinage. Cette discipline repose sur des principes d'ingénierie précis et sur l'utilisation habile de machines spécialisées pour façonner des matériaux tels que les métaux, les plastiques et les composites en pièces aux formes et aux spécifications désirées.

La fabrication mécanique joue un rôle crucial dans la création de produits allant des pièces automobiles aux composants aérospatiaux, en passant par les dispositifs médicaux et les équipements électroniques. Avec l'évolution des technologies, notamment l'introduction de machines à commande numérique et de logiciels de modélisation avancés, la fabrication mécanique est devenue plus précise, efficace et adaptable aux besoins changeants des industries modernes.

## II.2 Généralités sur les procédés de fabrication

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la Construction mécanique. Les techniques d'assemblage ne font pas partie des procédés de fabrication, elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées.[2]

La fabrication comprend quatre méthodes principales :

## II.3 Obtention par enlèvement de matière

Consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux). De manière générale on appelle usinage ces procédés. On y distingue : Le Tournage, Le Fraisage, La Rectification, L'électroérosion et Les découpages.

### II.3.1 Fraisage

Le fraisage est une méthode de fabrication qui consiste à enlever de la matière à une pièce et à obtenir des surfaces planes et parallèles. Cette méthode de découpe est réalisée par le biais d'un outil de fraisage et s'utilise pour produire des pièces mécaniques complexes de qualité. Les applications les plus courantes du fraisage sont la production de pièces moulées, La fabrication d'enveloppes mécaniques, et la fabrication d'éléments telle que des pièces de fixation.



Figure II-1 : frisape [3]

### II.3.2 Découpages

Le découpage est une technique qui repose sur l'interaction entre un matériau (pièce), tel que du métal, et un outil, permettant à l'opérateur de façonner la pièce à la forme souhaitée par rasage ou perçage. Une différence est faite sur les termes :

- **Découpage**, afin d'obtenir un pourtour défini selon une forme et des cotes précises.
- **Poinçonnage**, afin d'ajouter une pièce (exemple : une perforation).

#### II.3.2.1 Types de coupages



Figure II-2: Découpage Laser [4]



Figure II-3: Découpage jet d'eau [5]



Figure II-2 : L'oxycoupage [6]

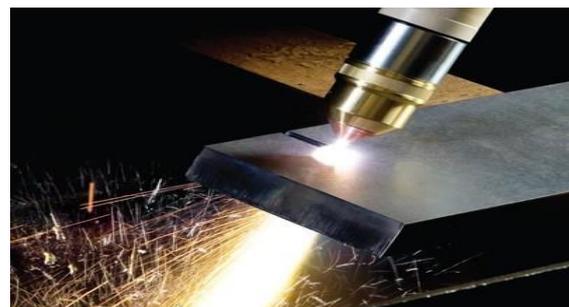


Figure II-3 : Découpage plasma [6]



Figure II-4 : Découpe a fil



Figure II-5 : Découpage par presse [7]

## II.4 Obtention par fusion

### II.4.1 Frittage

Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la **fusion**. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la **cohésion** de la pièce. Le cas le plus connu est celui de la cuisson des **poteries**.



Figure II-6 : Processus de frittage

### II.4.2 Moulage

Le moulage permet de réaliser des pièces pleines ou creuses, pouvant présenter des formes très compliquées, en remplissant de métal liquide ou de polymère pâteux une empreinte appelée **moule**. On réalise ainsi une sensible économie de matière et on réduit considérablement voire totalement les usinages d'où une économie substantielle (moyenne et grande séries).



Figure II-7 : Moulage en sable [8]

## II.5 Obtention par déformation

Consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée.

### II.5.1 Emboutissage

L'emboutissage est un terme qui définit une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable.

Les différentes phases de l'emboutissage :

**Phase 1 :** poinçon et serre-flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.

**Phase 2 :** le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de glisser.

**Phase 3 :** le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.

**Phase 4 :** le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

**Phase 5 :** on procède au « détourage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles. (Essentiellement les parties saisies par le serre-flan).

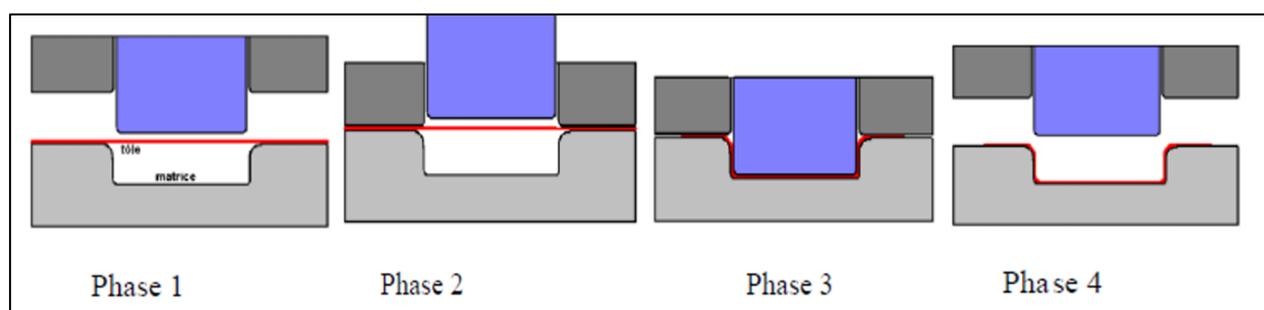


Figure II-8 : Les différentes phases de l'emboutissage [9]

## II.5.2 Cintrage

Le cintrage est un procédé mécanique de déformation d'un tube ou d'une barre, ou plus généralement, d'un profilé (creux ou non), selon un rayon et un angle défini. Il est effectué avec une **cintreuse**. Le terme cintrage est aussi utilisé pour désigner la transformation globale d'un produit cintré. Il existe plusieurs techniques : par **enroulement**, par **poussée**, par **roulage** et par **emboutissage**.

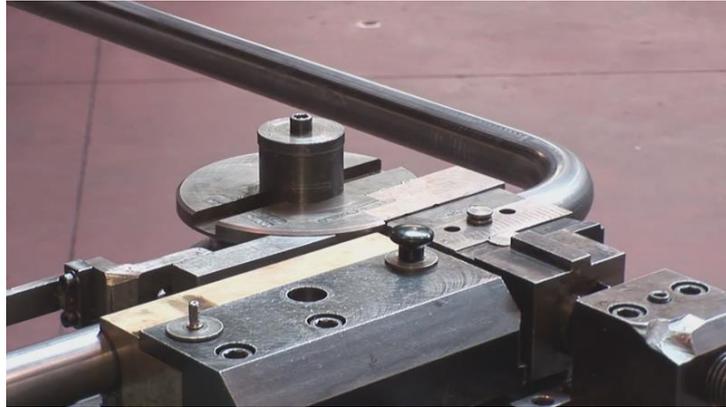


Figure II-9 : Cintrage d'un Tube Métallique [10]

## II.5.3 Pliage

Le pliage industriel consiste à fabriquer des pièces métalliques en déformant la tôle via la poussée d'un poinçon dans une matrice, qui va appliquer une force sur la tôle. Le pliage de la tôle permet de créer des géométries variées, des soyages et autres pliages complexes sur-mesure sans reprise de pièces.



Figure II-10 : Pliage de tôle [11]

### II.5.3.1 Types de pliage

Il existe différents types de pliage, dont les plus courants sont :

#### - Pliage en V

Le pliage est effectué dans une matrice en forme de V.

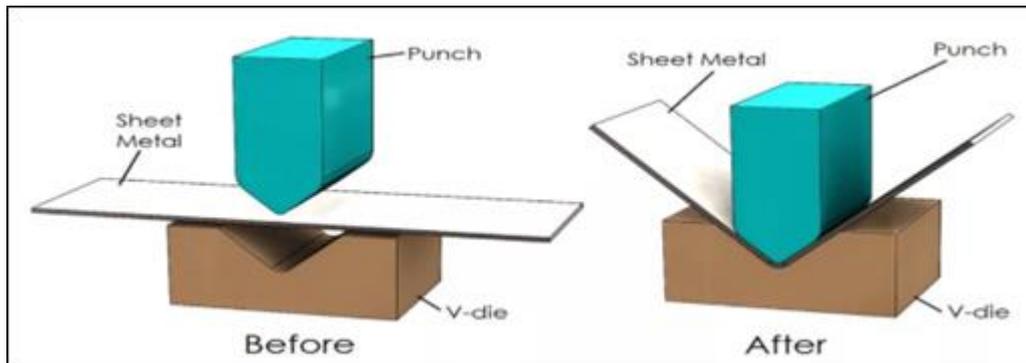


Figure II-11 : Pliage en V [12]

#### - Pliage par cambrage en U

Le pliage par cambrage s'apparente à de l'emboutissage. La matrice est creusée selon la forme voulue, et le poinçon pousse la tôle à l'intérieur de ce moule.

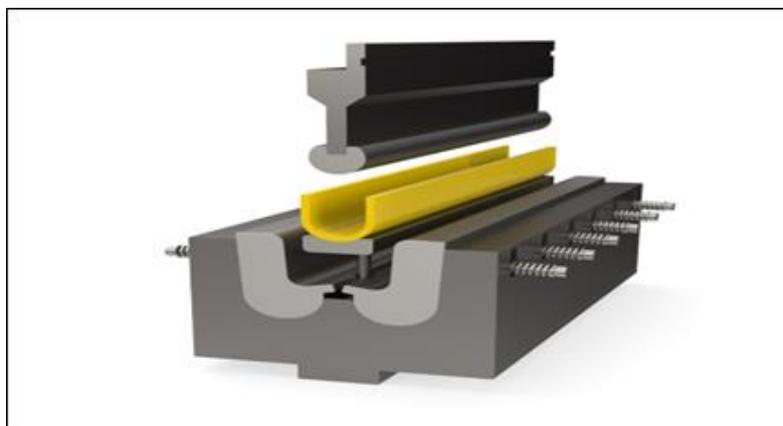


Figure II-12 : Pliage en U [12]

## II.6 Obtention par assemblage :

L'obtention par assemblage est une méthode de fabrication qui implique la réunion de plusieurs pièces ou composants distincts pour former un produit final. Cette méthode est

largement utilisée dans diverses industries pour créer des produits complexes à partir de parties individuelles.

### **II.6.1 Notion générale sur le soudage**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toute les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage ; soit par intervention par pression ; soit par l'un ou l'autre, avec ou sans métal d'apport dans la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle de matériaux de base. [13]

### **II.6.2 Historique du soudage**

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, la combustion de l'acétylène s'est développée rapidement et a été appliquée massivement à une grande variété de métaux. Ils utilisaient un arc électrique qui brûlait entre une électrode de carbone et le métal pour faire fondre le matériau. Cette méthode a été améliorée par l'utilisation d'une électrode métallique fusible à la place de l'électrode de carbone. En 1908, un scientifique suédois a inventé les électrodes métalliques enrobées de flux. En 1924, le soudage atomique a été développé aux États-Unis et cinq ans plus tard, le soudage à l'arc submergé a fait son apparition. Les années 1930 ont vu l'invention de l'électrode de tungstène, utilisée pour le soudage sous couvert de divers gaz nobles. À cette époque, les outils de soudage s'améliorent et se précisent, ce qui offre de nouvelles possibilités et permet de créer des méthodes plus complexes.[14]

### **II.6.3 Définition**

Le soudage est une opération qui consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.[15]

## II.6.4 Conception d'assemblage soudé

Un assemblage soudé se forme lorsque deux matériaux ou plus sont assemblés par le procédé de soudage avec ou sans ajout de matériau d'apport. Un assemblage soudé peut être créé à partir de métaux similaires ou différents.

Plusieurs facteurs contribuent à créer une bonne soudure. Il est essentiel de comprendre la conception d'assemblage pour produire une soudure de haute qualité.

La conception d'assemblage soudé détermine le type de soudure à produire pour répondre aux normes de qualité de l'application.

Quelques types d'assemblage :

### II.6.4.1 Assemblage bout à bout

Un assemblage bout à bout est formé lorsque deux pièces à souder sont placées dans le même plan et que le côté de chaque pièce à souder est assemblé par soudage. Il s'agit du type d'assemblage de soudage le plus couramment utilisé dans la fabrication de pipelines et de structures. Les assemblages bout à bout sont faciles à préparer pour le soudage. Il existe différentes variantes de cet assemblage soudé, et chacune vise un objectif différent.

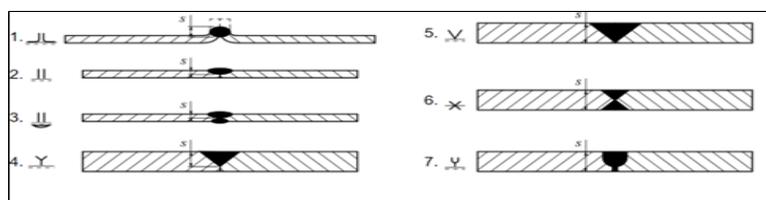
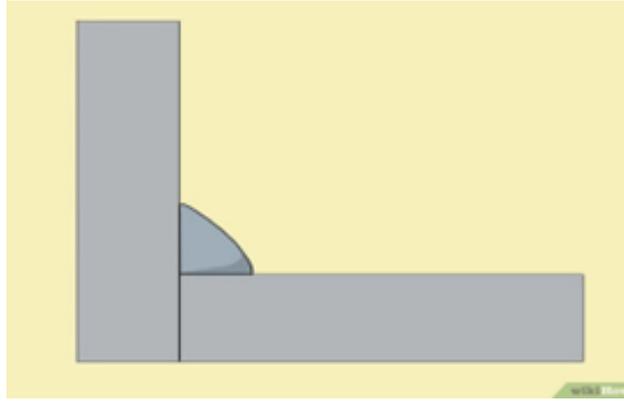


Figure II-13 : Assemblage bout à bout [17]

### II.6.4.2 Assemblage en angle

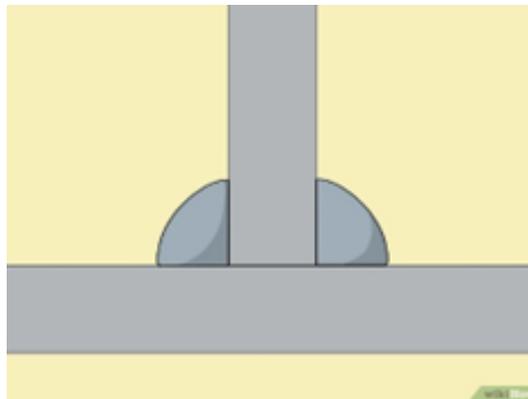
Un assemblage en angle est formé lorsque deux pièces à souder sont soudées à  $90^\circ$  en forme de L. Ce type d'assemblage est facile à créer et nécessite peu ou pas de préparation des bords. Il existe deux types d'assemblage en angle : l'assemblage en angle ouvert et l'assemblage en angle fermé. Dans un assemblage en angle fermé, le bord d'une pièce à souder affleure le bord d'une autre pièce à souder. Dans un assemblage en angle ouvert, les deux bords de la pièce se rejoignent aux angles. L'épaisseur de chaque pièce à souder est visible par une ouverture. Les assemblages en angle sont principalement utilisés pour les projets qui nécessitent un châssis carré.



**Figure II-14** : Assemblage d'angle [16]

### II.6.4.3 Assemblage en T

Un assemblage en T se forme lorsque deux pièces à souder se joignent à  $90^\circ$ . Dans ce type d'assemblage, le bord d'une pièce à souder est soudé au centre de la surface plane d'une autre pièce à souder pour prendre la forme d'un T. Un tuyau ou un tube soudé à une plaque d'embasement peut également former un assemblage en T. Ce type d'assemblage présente une résistance mécanique élevée, notamment lorsqu'il est soudé des deux côtés. Les assemblages en T sont utilisés dans de nombreuses applications de fabrication, y compris les tubes, l'acier de structure et l'équipement.



**Figure II-15** : Assemblage en T [16]

### II.6.4.4 Assemblage à recouvrement

Dans un assemblage à recouvrement, les deux pièces à souder se recouvrent. La soudure se forme à l'intersection des surfaces. L'épaisseur de la pièce à souder détermine la zone de recouvrement. Plus la pièce à souder est épaisse, plus la surface de recouvrement nécessaire est importante.

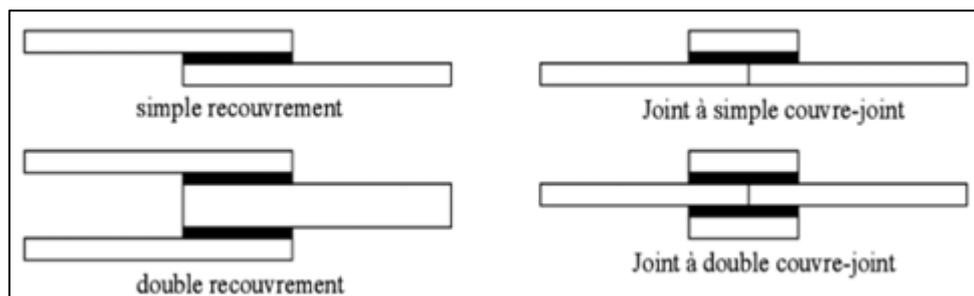


Figure II-16 : Types d'assemblage à recouvrement [17]

## II.6.5 Différents types de soudage

### II.6.5.1 Soudage à l'arc

La soudure à l'arc présente plusieurs avantages, comme la possibilité de réaliser de nombreux types de soudures sur différents types de métaux. C'est un procédé très polyvalent et utile pour produire des travaux de haute qualité.

La méthode à l'arc peut être réalisée facilement et rapidement par les débutants comme par les professionnels en soudure et en a fait l'un des procédés de soudage les plus populaires ces dernières années.

Pour réaliser une soudure à l'arc, il est nécessaire d'utiliser et de maîtriser l'arc électrique. La chaleur dégagée fait fondre simultanément le métal de la pièce principale et l'enrobage de l'électrode. Cela crée alors une fusion formant le laitier qui protège le métal déposé pendant et après la solidification.

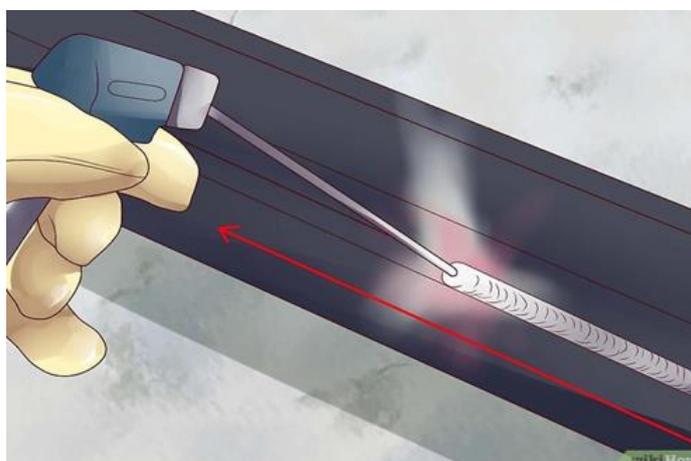


Figure II-17 : Soudage à l'arc [16]

### II.6.5.2 Soudure TIG

Tout comme le soudage MMA, le soudage TIG est une sorte de soudure utilisant l'arc électrique. Bien utilisé, ce procédé permet de réaliser des soudures de toutes sortes qui seront caractérisées par leur solidité, leur robustesse et leur résistance au cours du temps.

L'acronyme TIG provient du titre original du procédé, qui signifie « **Tungsten Inert Gas** ». Le tungstène est utilisé à la place de l'or en raison de ses propriétés de haute densité, tout en restant suffisamment léger pour ne pas causer de problèmes lors de la fusion de différents types d'alliages tels que l'aluminium, le bronze, la soudure de forge

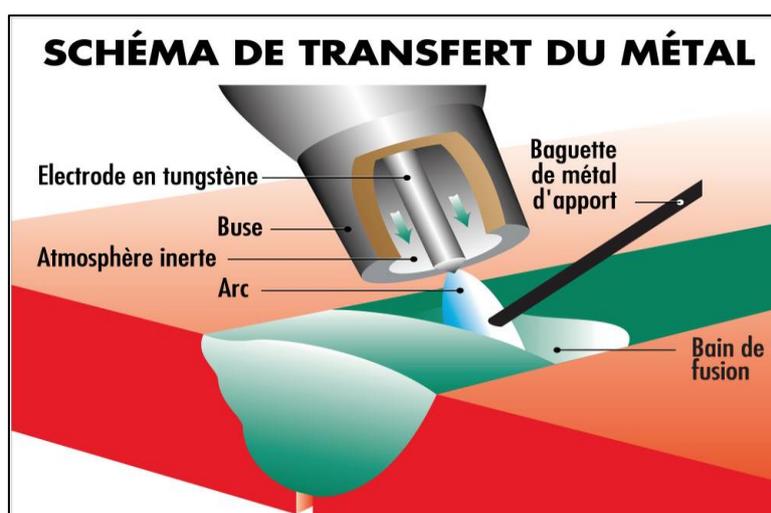


Figure II-18 : Schéma De Transfert Du Métal [18]

### II.6.5.3 Soudure MIG/MAG

Les acronymes MIG et MAG signifient respectivement *Metal inert gas* et *Metal active Gas*. La différence entre les deux procédés tient à la composition du gaz. Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu, contrairement au procédé MAG. Le gaz est injecté en continu sur l'arc afin d'isoler complètement le métal en fusion de l'air ambiant.



Figure II-19 : Soudure MIG/MAG [18]

#### II.6.5.4 Soudure au chalumeau

Ce procédé est très connu de tous et consiste à utiliser une flamme pour faire fondre un métal ou un alliage. Contrairement à d'autres types de soudure, le soudage au chalumeau est parfaitement adapté aux débutants. Pour commencer, assurez-vous que la flamme de votre chalumeau est correctement réglée. Si vous souhaitez utiliser cette méthode, contactez un professionnel de la soudure auparavant.



Figure II-20: Soudure au chalumeau [18]

#### II.6.5.5 Soudure laser

Dans le soudage au laser, un faisceau laser haute intensité est utilisé pour fondre et joindre les matériaux. Ce faisceau, concentré sur une zone très restreinte, permet de générer une chaleur intense, fondant rapidement les matériaux à souder. Cette méthode est réputée pour sa capacité à réaliser des soudures d'une propreté et d'une précision inégalées, sans contact direct avec les pièces à assembler, réduisant ainsi le risque de déformation ou d'endommagement des matériaux.



Figure II-21 : Soudure laser [18]

### II.6.5.6 Soudage par résistance

Ce type de soudage consiste à appliquer une force de pression sur les matériaux sous la forme d'électrodes spéciales. Les éléments à coller deviendront ainsi des composants du circuit électrique. À la suite de la mise sous tension de la source d'alimentation, le circuit est démarré. Dans les zones de plus grande résistance, de l'énergie thermique est générée, initiant le chauffage. Une fois l'alimentation coupée, les éléments matériels se refroidissent et se solidifient.

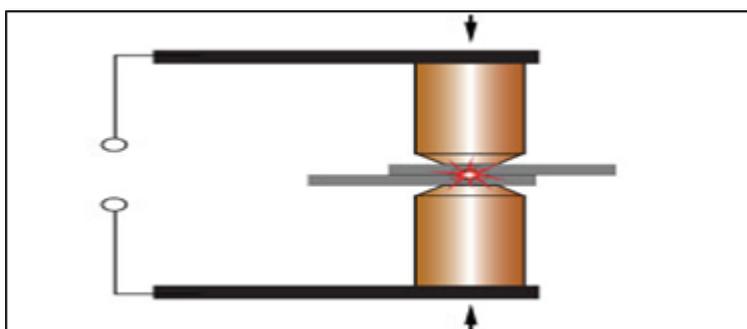


Figure II-22: Soudage par résistance [19]

### II.6.6 Risques liés aux soudages

**Exposition aux fumées et aux gaz :** Le soudage génère des fumées et des gaz potentiellement toxiques qui peuvent causer des problèmes respiratoires et des maladies à long terme, notamment des maladies pulmonaires.

**Brûlures :** Les températures élevées impliquées dans le soudage peuvent entraîner des brûlures graves sur la peau et les yeux si les précautions appropriées ne sont pas prises.

**Électrocution :** Le soudage implique souvent l'utilisation de courant électrique élevé, ce qui peut présenter un risque d'électrocution si les mesures de sécurité adéquates ne sont pas suivies.

**Incendies et explosions :** Les étincelles produites pendant le soudage peuvent entraîner des incendies ou des explosions s'ils entrent en contact avec des matériaux inflammables ou des gaz combustibles.

**Rayonnement UV et IR :** Le soudage génère des rayonnements ultraviolets (UV) et infrarouges (IR) qui peuvent endommager les yeux et la peau s'ils ne sont pas correctement protégés.

**Choc thermique :** Les pièces métalliques chauffées pendant le soudage peuvent se contracter rapidement en refroidissant, ce qui peut provoquer des déformations ou des fissures dans le métal.

**Chute d'objets :** Le soudage implique souvent le travail avec des pièces métalliques lourdes ou des équipements, ce qui peut présenter un risque de chute d'objets et de blessures associées.

**Bruits :** Certains processus de soudage peuvent générer des niveaux élevés de bruit, ce qui peut causer des dommages à l'ouïe s'ils ne sont pas correctement atténués.

Pour réduire ces risques, il est essentiel de suivre les procédures de sécurité appropriées, d'utiliser un équipement de protection individuelle (EPI) adéquat, de travailler dans des environnements bien ventilés et de suivre une formation appropriée sur les pratiques de sécurité en soudage.

## **II.7 Conclusion**

En résumé, ce chapitre a mis en évidence l'essence même de la fabrication mécanique, ainsi que l'importance vitale du soudage dans le contexte spécifique de notre projet de bras manipulateur de soudage. Nous avons exploré les principes fondamentaux de la fabrication mécanique, mettant en avant son rôle central dans la création de composants et d'assemblages précis et fiables. En parallèle, nous avons abordé la technique du soudage, soulignant sa pertinence dans la réalisation de notre projet en tant que méthode essentielle pour assembler et renforcer les pièces métalliques. À travers cette compréhension approfondie, nous sommes désormais mieux équipés pour aborder notre projet avec une vision claire des processus et des compétences nécessaires pour mener à bien la construction d'un bras manipulateur de soudage fonctionnel.

# Chapitre III

## *GÉNÉRALITÉS SUR LES ROBOTS*

### III.1 Introduction

De nos jours, les robots suscitent un intérêt croissant dans de nombreux domaines, de la fabrication à la médecine en passant par la vie quotidienne. Ces machines automatisées sont conçues pour effectuer une multitude de tâches, souvent avec une précision et une efficacité impressionnante. Mais qu'est-ce qu'un robot exactement et comment fonctionne-t-il ?

Les robots sont des machines programmables capables d'effectuer des tâches complexes ou répétitives. Contrairement à l'image populaire des robots humanoïdes futuristes, ils prennent une grande variété de formes, des bras robotisés des usines aux aspirateurs autonomes qui nettoient nos maisons. Leur conception et leur fonctionnement varient selon leur objectif spécifique.

Le développement des robots repose sur plusieurs disciplines, notamment l'informatique, l'ingénierie mécanique et électrique, ainsi que l'intelligence artificielle. Les avancées dans ces domaines ont permis aux robots d'accomplir des tâches de plus en plus complexes et de s'intégrer davantage dans notre société.

Dans ce chapitre, nous explorerons les différents types de robots, leur utilisation dans divers secteurs et les implications de leur adoption croissante dans notre quotidien. En comprenant mieux ces machines fascinantes, nous pouvons apprécier à la fois leurs capacités actuelles et leur potentiel futur.

### III.2 Définition d'un robot

Un robot est un système mécanique articuler et actionner à l'aide des moteurs, et commandé par une unité de contrôle. [20]

Selon Larousse : « Un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable ». [21]

La définition Japonaise est la plus vaste : « Tout mécanisme permettant d'effectuer, en tout ou en partie, une tâche normalement réalisée par l'homme ». [22]

Robot Institute of America a aussi défini le robot d'une manière plus en plus spécifique : « 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 ». [22]

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant : « un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable,

polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel ». [21]

### **III.3 Historique**

Le terme "**robot**" trouve son origine dans la langue tchèque, où son ancêtre, "**robota**", signifiait un **travail forcé**.

**1956** : Premier robot industriel fabriqué par « Unimate », utilisé par Général Motors dans une chaîne d'assemblage. [20]

**1959** : Une fraiseuse automatisée fabrique un cendrier commémoratif pour chaque participant. Produit par le laboratoire de Servomécanismes de Massachusetts Institute of Technology. [23]

**1966** : Le premier robot mobile développé par Le laboratoire « The Artificial Intelligence Center » de l'université de Stanford. [23]

**1973** : Développement du premier robot à 6 axes, par la société Allemande « KUKA Robotics ». [1]

**1999** : invention de AIBO, est un chien robot de compagnie développé et commercialisé par Sony.

**2000** : ASIMO, un robot humanoïde développé par Honda. Haut de 120 cm il marche à 1,6 km/h.

**2003** : Spirit et Opportunity sont deux sondes envoyées sur Mars [5]. 2008 : Nao est le premier robot humanoïde français. Il est autonome, programmable et de taille moyenne (environ 58 cm). [24]



**Figure III-1:**Premier robot industriel [25]

### **III.4 Classifications**

L'AFRI (Association Française de Robotique Industrielle) classe les robots en quatre catégories distinctes :

#### **III.4.1 Les Télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle**

Ils sont télécommandés "en temps réel" par un opérateur humain, à différentes distances, via des signaux mécaniques, hydrauliques ou électriques. Ces manipulateurs sont employés en forge, fonderie, meulage ébarbage, milieux "hostiles", etc., mais nécessitent toujours la présence et l'intervention constante d'un opérateur.

#### **III.4.2 Les Manipulateurs automatiques à cycles pré réglés**

Leurs mouvements sont restreints par des butées et des cames réglables manuellement. Leur commande s'effectue soit par des logiques à relais ou pneumatiques (séquences fixes), soit par des automates programmables et des cartes à microprocesseurs (séquences variables). Typiquement modulaires, ces dispositifs sont spécialement conçus pour une application spécifique.

#### **III.4.3 Les robots programmables**

Ils sont dirigés par des ordinateurs ou des armoires de commande numérique. Leurs mouvements continus dans l'espace sont alors programmés par apprentissage ou en langage symbolique par l'intermédiaire d'un clavier, ou encore sur l'écran d'un poste de CAO. Ils

réalisent des manipulations complexes, des opérations telles que le soudage, l'usinage, la découpe, la peinture et la pulvérisation, etc...

### **III.4.4 Les robots dits "intelligents"**

Equipés de capteurs (par exemple un système de vision artificielle ou de suivi de joint en soudage), ils peuvent analyser les modifications de leur environnement ou de leur trajectoire et réagir en conséquence. Ces machines, communément appelées robots de "deuxième génération", sont de plus en plus répandues dans l'industrie. La "troisième génération", dotée de capacités de raisonnement grâce à l'intelligence artificielle, fait actuellement l'objet de recherches poussées.

#### **III.4.4.1 Définition du robot industriel**

En parallèle de cette classification, l'AFNOR (Association Française de Normalisation) a publié une définition normalisée du robot industriel. Selon cette définition, un robot industriel est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, possédant plusieurs degrés de liberté et capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés lors de mouvements variables. Il est programmé pour effectuer une variété de tâches et présente souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise notamment un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances". Il est à noter qu'aucune classification n'est entièrement satisfaisante, car aucune ne prend en compte des critères techniques sans ambiguïté pour distinguer clairement chaque classe. Seules les deux dernières catégories de la classification de l'AFRI correspondent à la définition établie par l'AFNOR. C'est cette catégorie de robots qui nous intéresse dans la cadre de ce projet.

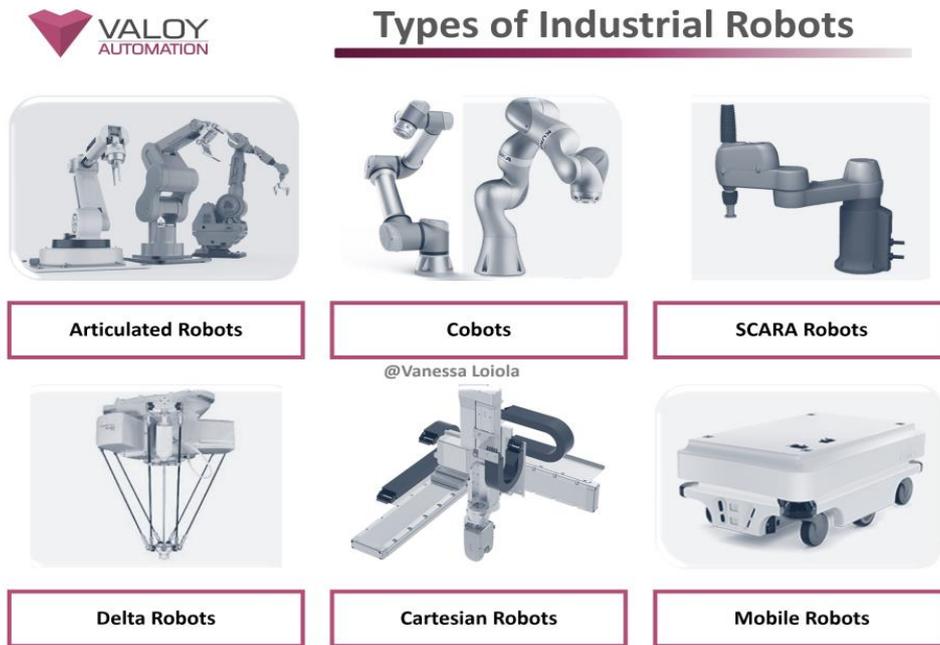


Figure III-2: Types des robots industriels

### III.5 Constitution d'un Robot

D'une manière générale on a 4 parties essentielles dans un robot manipulateur :

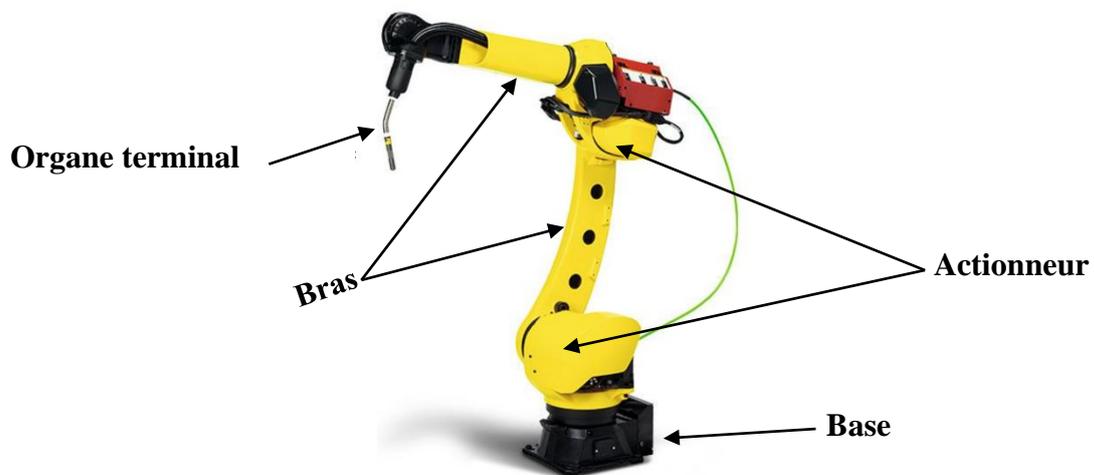


Figure III-3: Constitution d'un bras manipulateur

#### III.5.1 Système mécanique articulé (SMA)

C'est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il peut être représenté par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées **articulations**, généralement les uns à la suite des autres où

chaque solide est mobile par rapport au précédent. Cette mobilité s'exprime en termes de **degrés de liberté (d.d.l)** qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide  $S_{n-1}$  par rapport au solide qui lui est directement relié  $S_n$ . Le rôle du robot est de positionner l'**organe terminal** dans une situation spécifique (position et orientation), en respectant des caractéristiques définies de vitesse et d'accélération. Sa motorisation est assurée par des **actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques**, qui transmettent leurs mouvements aux **articulations** à travers des systèmes adaptés.

### III.5.1.1 Degrés de libertés

C'est le nombre d'orientations possible dans l'espace. Chaque un ddl représente une articulation, elle peut être rotoïde ou prismatique selon l'architecture voulue. Chaque un robot possède n nombre de degrés de liberté (ddl), généralement ne dépasse pas six (6) ddl. Dans notre cas, le robot de soudage possède 3 (3) ddl rotoïdes.

### III.5.1.2 Types des articulations

Une articulation sert à lier deux corps successifs, en limitant leurs nombres de ddl l'un par rapport à l'autre. En robotique, les articulations utilisées sont de type simple (un seul degré de liberté), Elles peuvent être donc soit **rotoïde** ou **prismatique**:

#### a) Articulation rotoïde

Elle s'agit d'une articulation de type pivot, notée R. elle limite le nombre de ddl en une rotation autour d'un axe commun.

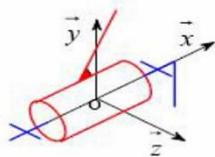
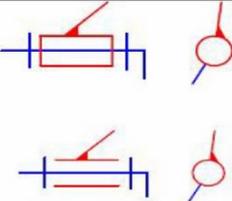
Liaison	Schéma 3D	Schéma 2D	Degrés de liberté										
Liaison Pivot d'axe $(O, \vec{x})$ 			<table border="0"> <tr> <td>Translation</td> <td>Rotation</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>Rx</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"><i>1 degré de liberté</i></td> </tr> </table>	Translation	Rotation	0	Rx	0	0	0	0	<i>1 degré de liberté</i>	
Translation	Rotation												
0	Rx												
0	0												
0	0												
<i>1 degré de liberté</i>													

Figure III-4:Caractéristique d'une Liaison Pivot [26]

### b) Articulation prismatique

Elle s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps en une translation au long d'un axe commun.

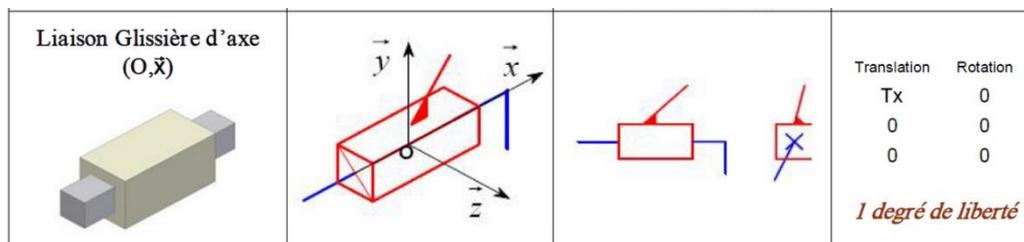


Figure III-5:Caractéristique d'une Liaison Glissière [26]

### III.5.1.3 Organe terminal

C'est le dernier corps du robot, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Il est destiné à porter le manipulateur d'objet, comme l'outil, torche de soudage, dispositif de serrage, etc.



Figure III-6:Organe terminal [21] [29]

## III.5.2 Actionneurs

Les composants chargés de mettre en mouvement les organes des machines sont appelés actionneurs. Principalement, ce sont des **moteurs** et des **vérins**. Ils convertissent de l'énergie électrique, hydraulique ou pneumatique en énergie mécanique, mais leur fonctionnement est généralement contrôlé par des signaux de commande électriques. Avec l'évolution

technologique progressive dans le domaine de l'informatique et l'électronique telle que les micro-ordinateurs, l'automate programmable, les microprocesseurs et les microcontrôleurs ainsi que les composants semi-conducteurs...etc. ; les actionneurs électriques ont plus en plus utilisés dans le domaine de la robotique.

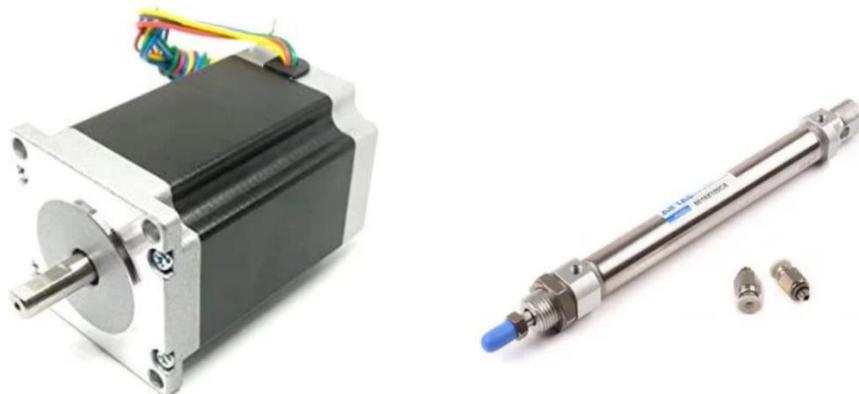


Figure III-7: Actionneurs

a) Moteur électrique

b) Vérin pneumatique

### III.5.3 Capteurs

Les capteurs sont des dispositifs qui convertissent une grandeur physique (telle que la position, la distance, la vitesse, la température, la pression, etc.) d'une machine ou d'un processus en une grandeur normalisée, souvent électrique.

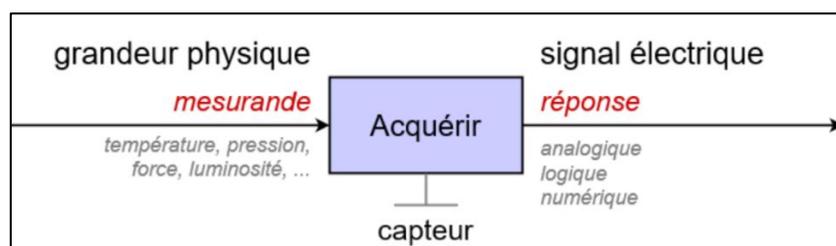


Figure III-8: Principe du capteur

#### III.5.3.1 Types des capteurs

En robotique, il existe une grande variété de capteurs utilisés pour différentes fonctions et applications. Voici quelques-uns des types de capteurs les plus couramment utilisés :

### a) Capteurs de distance

Ils mesurent la distance entre le robot et un objet. Les capteurs ultrasoniques, infrarouges et lidar sont couramment utilisés pour cette fonction.



Figure III-9: Capteurs de distance

### b) Capteurs de mouvement

Ces capteurs détectent les mouvements du robot ou des objets autour de lui. Les accéléromètres, les gyroscopes et les capteurs de force peuvent être utilisés pour cette tâche.



Figure III-10: Capteur de mouvement

### c) Capteurs de température

Ils mesurent la température de l'environnement ou des composants du robot. Ces capteurs sont importants pour surveiller les conditions environnementales ou prévenir la surchauffe des composants.

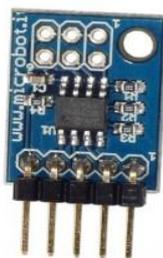


Figure III-11: Capteur de température

### d) Capteurs de position et d'orientation

Ils déterminent la position et l'orientation du robot dans son environnement. Les systèmes de localisation par satellite (GPS), les gyroscopes et les odomètres sont des exemples de capteurs utilisés pour cette fonction.

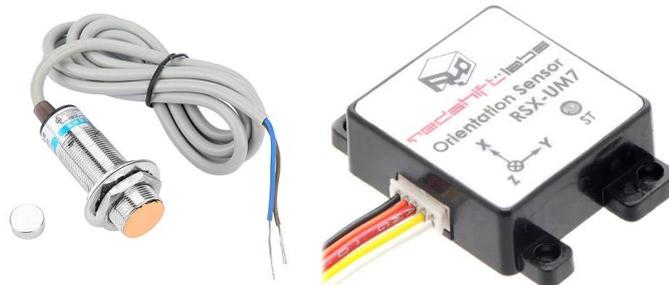


Figure III-12: Capteur de position et d'orientation

### III.5.4 Partie commande

Il s'agit de la partie intelligente du robot, il sert principalement à trois rôles essentiels [26]

- **Le rôle de l'information** : il consiste à collecter les informations venant des capteurs
- **Le rôle de décision** : à partir des informations reçues, un algorithme implémenté dans l'unité de calcul a comme fonction d'envoyer des autres signaux aux actionneurs.
- **Le rôle de communication** : il s'agit de mettre le robot en relation avec son environnement.

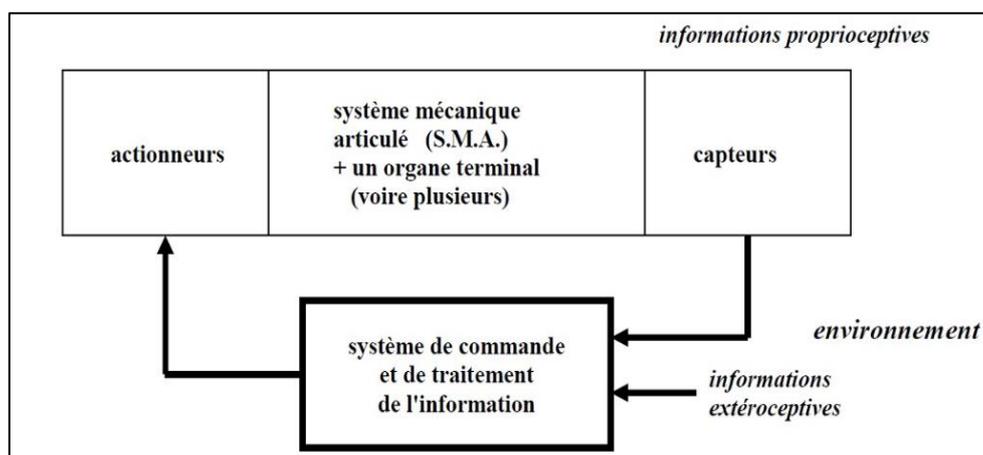


Figure III-13: Schéma fonctionnel d'un robot industriel

### III.6 Domain d'utilisation des robots

La robotique possède de nombreux domaines d'application. Effectivement, à leurs débuts, les robots ont été principalement déployés dans les industries, offrant la possibilité d'accomplir des tâches répétitives avec une précision constante. Dans ce qui suit, nous allons citer quelque usage d'application. [7] [8]

#### III.6.1 Assemblage

Pour optimiser les chaînes de production, on utilise les robots manipulateurs dans la fonction d'assemblage. C'est une tâche assez pénible qui nécessite une grande rapidité. On peut même l'utiliser pour du micro-assemblage dont on a besoin d'une précision assez élevée.



Figure III-14: Robots d'assemblage automobile [29]

#### III.6.2 Peinture

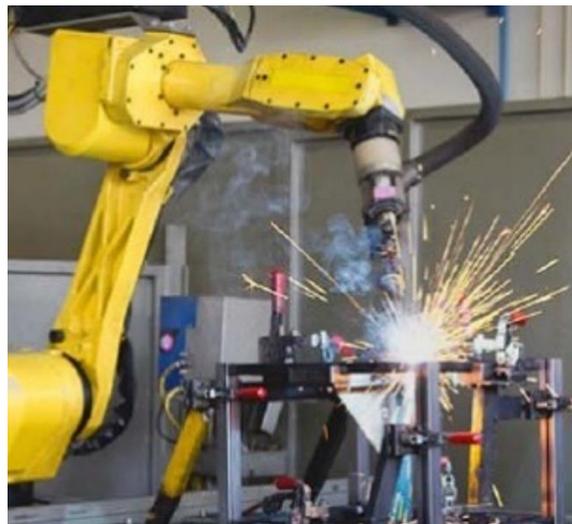
L'utilisation d'un robot spécifique peinture offre un contrôle précis du processus peinture (apprêts, base, vernis) et des différents paramètres (largeur de jet, air d'atomisation, pression...). Et aussi, les produits utilisés sont souvent toxiques, ce qui rend l'environnement de travail hostile. La robotisation de cette tâche reste donc indispensable.



**Figure III-15:**Robot de peinture [28] [29]

### III.6.3 Soudage

Le soudage est l'une des applications robotisées les plus répandues. Le gain de productivité est en effet très significatif, généralement deux à cinq fois supérieur à celui des opérations de soudage manuel. Les autres avantages de la robotisation des opérations de soudage à l'arc résident dans l'élimination des tâches dangereuses pour la santé en raison de l'exposition aux fumées nocives, ainsi que dans la facilitation de la manipulation des pièces de grandes dimensions.



**Figure III-16:**Robot de soudage [29]

### **III.7 Conclusion**

En conclusion, les robots représentent une révolution technologique majeure qui façonne notre société contemporaine. Leur présence croissante dans divers domaines, qu'il s'agisse de la fabrication, de la santé, de l'exploration spatiale ou même de nos foyers, témoigne de leur polyvalence et de leur utilité. Cependant, cette montée en puissance des robots soulève également des questions éthiques et sociales importantes, notamment en ce qui concerne l'impact sur l'emploi, la sécurité et la vie privée. Pourtant, avec une approche équilibrée et responsable, les robots ont le potentiel d'améliorer notre qualité de vie, de stimuler l'innovation et de nous aider à relever certains des défis les plus pressants de notre époque. En embrassant ces technologies avec prévoyance et en les intégrant de manière éthique dans notre société, nous pouvons forger un avenir où les robots sont des partenaires précieux dans notre quête collective de progrès et de bien-être.

# Chapitre IV

*MODÉLISATION ET COMMANDE DE ROBOT*

## IV.1 Introduction

Ce chapitre est divisé en trois parties, la première concerne la modélisation de notre robot.

Dans la deuxième partie, nous intéressons donc à la conception de notre robot, en prenant compte des contraintes de la géométrie de système mécanique articulé (SMA).

On termine ce chapitre par la commande et simulation de notre bras manipulateur.

## IV.2 Problématique

Comment une entreprise de fabrication de coffres-forts peut-elle optimiser son processus de soudage en passant du soudage manuel à un soudage semi-automatique ou automatique, notamment par l'intégration d'un robot à trois degrés de liberté (3 ddl) ?

**Soficlef** utilise actuellement un processus de soudage manuel, ce qui présente plusieurs défis, notamment en termes de qualité, de productivité et de sécurité des opérateurs. Le soudage manuel est souvent sujet à des variations de qualité, dépend fortement des compétences des soudeurs, et peut entraîner des coûts élevés en raison du temps de travail prolongé et des possibles reprises nécessaires. De plus, les conditions de travail peuvent être difficiles et dangereuses pour les soudeurs.

## IV.3 Objectifs

- **Améliorer la qualité du soudage** : Réduire les variations de qualité et garantir une uniformité dans les soudures des coffres-forts.
- **Augmenter la productivité** : Réduire le temps de soudage par pièce et augmenter le volume de production sans compromettre la qualité.
- **Renforcer la sécurité des opérateurs** : Minimiser les risques liés aux opérations de soudage manuel et améliorer les conditions de travail.
- **Réduire les coûts** : Optimiser les coûts de production en diminuant le temps de soudage et en réduisant les erreurs et les reprises.

## IV.4 Hypothèse

L'intégration d'un robot de soudage à trois degrés de liberté (3 ddl) pourrait permettre de répondre à ces objectifs en automatisant partiellement ou totalement le processus de soudage. Ce robot serait capable de réaliser des soudures de haute précision de manière répétitive, améliorant ainsi la qualité et la consistance des produits tout en augmentant la productivité et la sécurité.

## IV.5 Modélisation de robot

La modélisation d'un robot est un processus crucial dans le domaine de la robotique, impliquant la création de représentations mathématiques ou informatiques pour décrire son comportement, sa structure et ses caractéristiques physiques. Cette modélisation revêt plusieurs aspects essentiels :

### IV.5.1 Modélisation géométrique

#### IV.5.1.1 Modèle géométrique directe (MGD)

Le modèle géométrique direct d'un robot est un cadre mathématique fondamental utilisé pour déterminer la position et l'orientation de son effecteur terminal en fonction des paramètres articulaires du robot. Ce modèle prend en compte les caractéristiques géométriques de chaque maillon ainsi que les angles de chaque articulation pour calculer avec précision la configuration spatiale de l'effecteur terminal par rapport à un système de coordonnées de référence.

Il existe des méthodes et notations utilisées pour la modélisation géométrique des robots. La plus répandue est celle de **Denavit-Hartenberg**

#### a) Méthode de Denavit-Hartenberg

La méthode de Denavit-Hartenberg se base sur l'assignation d'un repère à chaque composant du robot, noté  $R_0, R_1, R_1, \dots, R_n$ . Chaque articulation  $j$  est délimitée par deux repères adjacents  $R_{j-1}$  et  $R_j$

Cette méthode s'appuie sur quatre paramètres géométriques essentiels pour décrire la transition entre ces repères :

- $\alpha_j$ : 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  $Z_j$ .

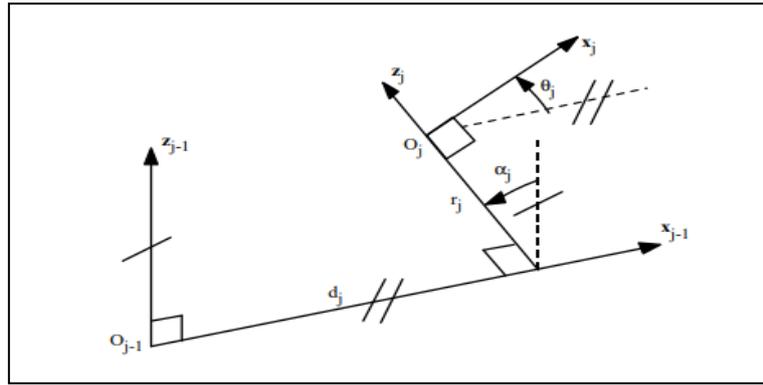


Figure IV-1 : Paramètres géométriques

À partir de ces paramètres, on calcule la matrice de passage  ${}^{i-1}\mathbf{M}_i$  entre chaque deux repères successifs, qu'on l'appelle la **matrice homogène**.

$${}^{i-1}\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & r_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & r_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Enfin, on déduit la matrice homogène entre la base et l'organe terminal  ${}^0\mathbf{M}_n$ , qui est la matrice de passage entre le premier repère fixé à la base et le dernier fixé avec l'organe terminal.

**b) Application du théorème de D-H sur le robot**

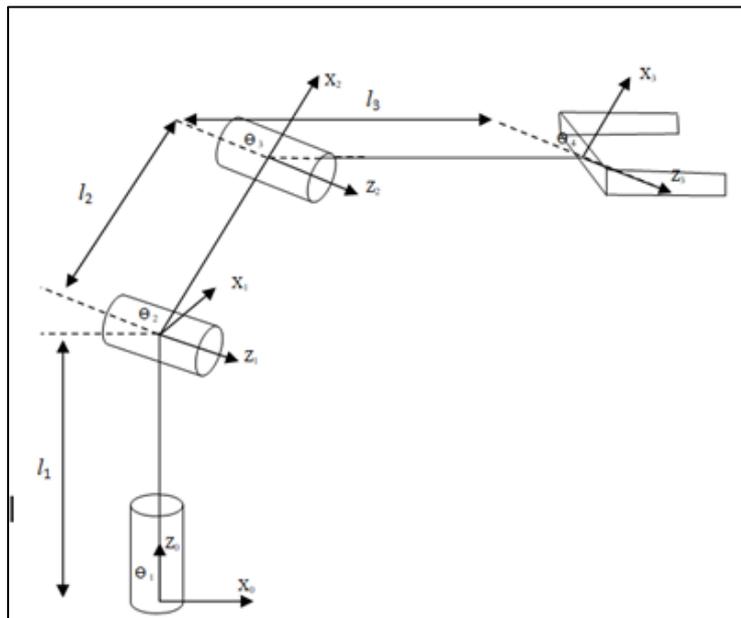


Figure IV-2 : Les repères du Robot

Tableau IV-1: Paramètres géométriques

$\theta_i$	$d_i$	$\alpha_i$	$r_i$
$\theta_1$	$l_1$	$\pi/2$	0
$\theta_2$	0	0	$l_2$
$\theta_3$	0	0	$l_3$

- Les matrices de passages :

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La position et l'orientation du poignet du robot articulé peuvent être obtenues par le calcul de matrice homogène  $H_3^0$  :

$$H_3^0 = H_1^0 \times H_2^1 \times H_3^2$$

$$H_3^0 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} C_{(\theta_2+\theta_3)} & -C_{(\theta_1)} C_{(\theta_2+\theta_3)} & S_{(\theta_1)} & C_{(\theta_1)}(l_3 C_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 C_{(\theta_2)}) \\ S_{(\theta_1)} C_{(\theta_2+\theta_3)} & -S_{(\theta_1)} S_{(\theta_2+\theta_3)} & -C_{(\theta_1)} & S_{(\theta_1)}(l_3 C_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 C_{(\theta_2)}) \\ S_{(\theta_2+\theta_3)} & C_{(\theta_2+\theta_3)} & 0 & l_3 S_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 S_{(\theta_2)} + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_X = C_{(\theta_1)}(l_3 C_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 C_{(\theta_2)}) \quad [\text{IV.1}]$$

$$\mathbf{P}_Y = S_{(\theta_1)}(l_3 C_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 C_{(\theta_2)}) \quad [\text{IV.2}]$$

$$\mathbf{P}_Z = l_3 S_{(\theta_2+\theta_3)} + l_2 S_{(\theta_2)} + l_1 \quad [\text{IV.3}]$$

### IV.5.1.2 Modèle géométrique inverse (MGI)

Le modèle géométrique inverse est un outil utilisé pour déterminer les positions angulaires des articulations d'un robot en fonction de la position et de l'orientation désirées de son effecteur terminal. En d'autres termes, il permet de calculer les angles et les déplacements des articulations lorsque la position de l'effecteur terminal est modifiée.

Pour calculer le **MGI**, plusieurs méthodes sont disponibles, telles que la méthode algébrique, la méthode analytique (comme celles de **Paul** et **Peiper**), et la méthode générale de **Raghavan** et **Roth**. Dans ce cas, nous avons opté pour la méthode algébrique :

Calcul de  $\theta_1$  :

À partir de l'équation [IV.1] et [IV.2] nous avons obtenu  $\theta_1$ :

$$\frac{py}{px} = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan^{-1}(\theta_1)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) \quad [\text{IV.4}]$$

Calcul de  $\theta_3$  :

On a :

$$\mathbf{P}_X = C_1(l_3 C_{(2+3)} + l_2 C_2)$$

$$\mathbf{P}_Y = S_1(l_3 C_{(2+3)} + l_2 C_2)$$

$$\mathbf{P}_Z - l_1 = l_3 S_{(2+3)} + l_2 S_2$$

On pose :

$$\mathbf{a} = (l_3 C_{(2+3)} + l_2 C_2) \quad [\text{IV.5}]$$

$$\mathbf{b} = (l_3 S_{(2+3)} + l_2 S_2) \quad [\text{IV.6}]$$

Alors :

$$P_x = C_1 a \quad [IV.7]$$

$$P_y = S_1 a \quad [IV.8]$$

$$P_z - l_1 = b \quad [IV.9]$$

Donc :

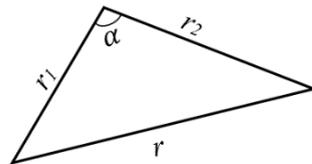
$$P_x^2 = C_1^2 a^2$$

$$P_y^2 = S_1^2 a^2$$

$$P_x^2 + P_y^2 = a^2$$

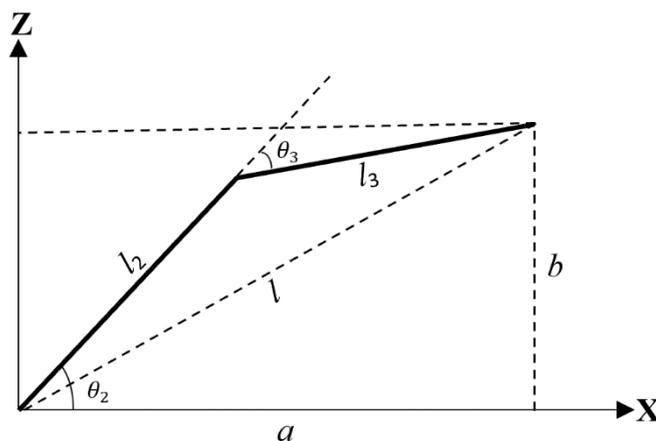
$$a = \pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad [IV.10]$$

Selon Le théorème d'Al-Kashi :



$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \alpha$$

Le schéma de modèle géométrique directe :



$$l^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2 l_3 C_3 \quad [IV.11]$$

Et d'après le schéma ci-dessus

$$l^2 = a^2 + b^2 \quad [\text{IV.12}]$$

En combinant les équations [IV.13] et [IV.14] :

$$C_3 = \frac{-a^2 - b^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$C_3 = \frac{-(P_x^2 + P_y^2) - (P_z - l_1)^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3} \quad [\text{IV.15}]$$

$$S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2} \quad [\text{IV.16}]$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(S_3, C_3) \quad [\text{IV.17}]$$

Calcule  $\theta_2$ :

$$a = l_2C_2 + l_3(C_2C_3 - S_2S_3)$$

$$a = C_2(l_2 + l_3C_3) + S_2(-l_3S_3) \quad [\text{IV.18}]$$

$$b = l_2S_2 + l_3(C_2S_3 + S_2C_3)$$

$$b = C_2(l_3S_3) + S_2(l_2 + l_3C_3) \quad [\text{IV.19}]$$

On écrit les équations [IV.20] et [IV.21] sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 + l_3C_3 & -l_3S_3 \\ l_3S_3 & l_2 + l_3C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ S_2 \end{bmatrix}$$

Calculant le déterminant de ce système linéaire par rapport aux deux inconnus  $C_2$  et  $S_2$ :

$$\Delta = (l_2 + l_3C_3)^2 + (l_3S_3)^2 \quad [\text{IV.22}]$$

Selon la méthode de Cramer :

$$C_2 = \frac{\begin{bmatrix} a & -l_3S_3 \\ b & l_2 + l_3C_3 \end{bmatrix}}{\Delta} \quad [\text{IV.23}]$$

$$S_2 = \frac{\begin{bmatrix} l_2 + l_3 C_3 & a \\ l_3 S_3 & b \end{bmatrix}}{\Delta} \quad [\text{IV.24}]$$

$$C_2 = \frac{a(l_2 + l_3 C_3) + b(l_3 S_3)}{(l_2 + l_3 C_3)^2 + (l_3 S_3)^2} \quad S_2 = \frac{b(l_2 + l_3 C_3) - a(l_3 S_3)}{(l_2 + l_3 C_3)^2 + (l_3 S_3)^2}$$

$$\theta_2 = \text{atan} \frac{b(l_2 + l_3 C_3) - a(l_3 S_3)}{a(l_2 + l_3 C_3) + b(l_3 S_3)} \quad [\text{IV.25}]$$

## IV.5.2 Modélisation cinématique

### IV.5.2.1 Modèle cinématique direct (MCD)

Il est appelé aussi le modèle différentiel direct, il décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires. Il est noté :

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

Où :

- $\dot{\mathbf{X}}$  : est le vecteur des vitesses opérationnelles
- $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  : est la matrice jacobienne dépendant des coordonnées articulaires  $\mathbf{q}$
- $\dot{\mathbf{q}}$  : est le vecteur des vitesses articulaires.

Selon la définition précédente le calcul du modèle cinématique directe d'un bras manipulateur se ramène à celui de la matrice jacobienne.

#### a) Matrice jacobienne

Considérons un bras manipulateur avec  $n$  articulations. Nous pouvons écrire le modèle géométrique direct comme :

$$T(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\mathbf{q}) & \mathbf{p}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

Où :

$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T$  : est le vecteur des variables articulaires.

Les relations entre les vitesses articulaires  $\dot{\mathbf{q}}$  et la vitesse linéaire  $\dot{\mathbf{p}}_e$  et la vitesse angulaire  $\boldsymbol{\omega}_e$  de l'effecteur final :

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \mathbf{J}_p(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad [\text{IV.26}]$$

$$\boldsymbol{\omega}_e = \mathbf{J}_\omega(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad [\text{IV.27}]$$

Où :

$\mathbf{J}_p(\mathbf{q})$  : Matrice jacobienne qui relie la contribution des vitesses des articulations  $\dot{\mathbf{q}}$  à la vitesse linéaire de l'effecteur  $\dot{\mathbf{p}}_e$

$\mathbf{J}_\omega(\mathbf{q})$  : Matrice jacobienne qui relie la contribution des vitesses des articulations  $\dot{\mathbf{q}}$  à la vitesse angulaire de l'effecteur  $\boldsymbol{\omega}_e$

Les équations ci-dessus peuvent être combinées pour former  $\mathbf{J}$ , qui inclut à la fois la vitesse linéaire et angulaire :

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_e \\ \boldsymbol{\omega}_e \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad [\text{IV.28}]$$

Où :

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p(\mathbf{q}) \\ \mathbf{J}_\omega(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad [\text{IV.29}]$$

Avec  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  est sous la forme :

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p1} & & \mathbf{J}_{pn} \\ & m * n & \\ \mathbf{J}_{\omega 1} & & \mathbf{J}_{\omega n} \end{bmatrix}$$

Il a un nombre de colonnes égal au nombre de degrés de liberté dans l'espace articulaire, et un nombre de lignes égal au nombre de degrés de liberté dans l'espace cartésien, trois lignes pour la vitesse linéaire dans les directions  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  et  $\mathbf{z}$ , et trois pour la vitesse angulaire

## b) Calcul de jacobienne

Pour calculer le jacobienne, il convient de procéder séparément pour les vitesses linéaires et angulaires.

- Pour la contribution à la vitesse linéaire :

On peut écrire la dérivée de  $\mathbf{p}_e(\mathbf{q})$  par rapport au temps, comme suit :

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \mathbf{p}_e}{\partial \mathbf{q}_i} \dot{\mathbf{q}}_i = \sum_{i=1}^n \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i \quad \text{[IV.30]}$$

$\mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i$  : Contribution de la vitesse de l'articulation  $i$  à la vitesse linéaire de l'effecteur lorsque toutes les autres articulations sont immobiles

- Articulation rotoïde :

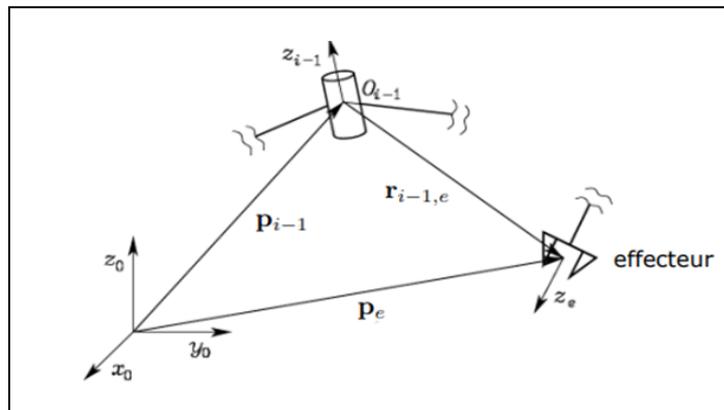


Figure IV-3 :Caractérisations d'une articulation rotoïde

Si l'articulation  $i$  rotoïde ( $\mathbf{q}_i = \theta_i$ ), en observant que la contribution à la vitesse linéaire doit être calculée par rapport à l'origine du repère "e" de l'effecteur, nous avons que :

$$\mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \dot{\theta}_i \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_{i-1})$$

Donc

$$\mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \dot{\theta}_i \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_{i-1}) \quad \text{[IV.31]}$$

Où

$\mathbf{z}_{i-1}$  : est le vecteur unitaire de l'axe de l'articulation  $i$

$\mathbf{p}_{i-1}, \mathbf{p}_e$  : Position des origines des repères  $i-1$  et  $e$  exprimées dans le repère  $0$

- Articulation prismatique :

Si l'articulation  $i$  est prismatique ( $\mathbf{q}_i = \mathbf{d}_i$ ) :

$$J\mathbf{p}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \dot{\mathbf{d}}_i \mathbf{z}_{i-1}$$

Donc

$$J\mathbf{p}_i = \mathbf{z}_{i-1} \quad [\text{IV.32}]$$

- Pour la contribution à la vitesse angulaire :

On a :

$$\boldsymbol{\omega}_e = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\omega}_{i-1,i} = \sum_{i=1}^n J\boldsymbol{\omega}_i \dot{\mathbf{q}}_i \quad [\text{IV.33}]$$

On peut encore caractériser les termes  $J\boldsymbol{\omega}_i \dot{\mathbf{q}}_i$

- Articulation rotoïde :

Si l'articulation  $i$  est rotoïde :

$$J\boldsymbol{\omega}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \mathbf{z}_{i-1}$$

Donc :

$$J\boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{z}_{i-1} \quad [\text{IV.34}]$$

- Articulation prismatique :

Si l'articulation  $i$  est prismatique :

$$J\boldsymbol{\omega}_i \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{0}$$

Donc :

$$J\boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{0} \quad [\text{IV.35}]$$

Alors :

$$J\mathbf{p}_i = \begin{cases} \mathbf{z}_{i-1} \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_{i-1}) & \text{Pour articulation rotative } i \\ \mathbf{z}_{i-1} & \text{pour articulation prismatique } i \end{cases} \quad [\text{IV.36}]$$

$$J\boldsymbol{\omega}_i = \begin{cases} \mathbf{z}_{i-1} & \text{Pour articulation rotative } i \\ \mathbf{0} & \text{pour articulation prismatique } i \end{cases} \quad [\text{IV.37}]$$

Cette expression permet de calculer la matrice jacobienne d'un bras manipulateur d'une façon simple et systématique à partir du modèle géométrique direct

En effet:  $\mathbf{z}_{i-1}$ ,  $\mathbf{p}_e$  et  $\mathbf{p}_{i-1}$  sont des fonctions des variables articulaires

- $\mathbf{z}_{i-1}$  : est donné par la 3<sup>ème</sup> colonne de la matrice de rotation  $\mathbf{R}_{i-1}^0$
- $\mathbf{p}_e$  : est donné par les trois premiers éléments de la 4<sup>ème</sup> colonne de la matrice de transformation  $\mathbf{T}_e^0$
- $\mathbf{p}_{i-1}$  : est donné par les trois premiers éléments de la 4<sup>ème</sup> colonne de la matrice de transformation  $\mathbf{T}_{i-1}^0$

### c) Détermination la matrice jacobienne de robot choisi

À partir de les équations [IV.38], [IV.39] on trouve la matrice jacobienne de robot choisi:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} z_0 \times (p_3 - p_0) & z_1 \times (p_3 - p_1) & z_2 \times (p_3 - p_2) \\ z_0 & z_1 & z_2 \end{bmatrix}$$

À partir de la géométrie directe, nous pouvons trouver la direction des axes des articulations ( $\mathbf{z}_0 \dots \mathbf{z}_2$ ):

La direction de l'axe de l'articulation  $\mathbf{z}_0$  est :

$$\mathbf{z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

À partir de la matrice  $\mathbf{H}_1^0$  la valeur du vecteur  $\mathbf{z}_1$  est :

$$\mathbf{z}_1 = \begin{bmatrix} S_1 \\ -C_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le vecteur  $\mathbf{z}_2$  est calculé en multipliant la matrice  $\mathbf{H}_1^0$  par la matrice  $\mathbf{H}_2^1$  pour obtenir  $\mathbf{H}_2^0$  :

$$\mathbf{H}_2^0 = \mathbf{H}_1^0 \cdot \mathbf{H}_2^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_2^0 = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & l_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & l_2 S_1 S_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_1 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Alors :

$$\mathbf{z}_2 = \begin{bmatrix} S_1 \\ -C_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De plus, nous pouvons trouver la valeur de  $(\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_{i-1})$  :

$$\mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} l_2 C_1 C_2 \\ l_2 S_1 C_2 \\ l_2 S_1 + l_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} l_2 C_1 C_2 + l_3 C_1 C_{(2+3)} \\ l_2 S_1 C_2 + l_3 S_1 C_{(2+3)} \\ l_2 S_2 + l_3 S_{(2+3)} + l_1 \end{bmatrix},$$

Ensuite, les éléments de la matrice jacobienne du robot articulé deviendront :

$$\mathbf{z}_0 \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_0) = \begin{bmatrix} -l_2 S_1 C_2 - l_3 S_1 C_{(2+3)} \\ l_2 C_1 C_2 + l_3 C_1 C_{(2+3)} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z}_1 \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1) = \begin{bmatrix} -l_2 S_2 C_1 - l_3 C_1 S_{(2+3)} \\ -l_2 S_2 S_1 - l_3 S_1 S_{(2+3)} \\ l_3 C_{(2+3)} + l_2 C_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{z}_2 \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_2) = \begin{bmatrix} -l_3 C_1 S_{(2+3)} \\ -l_3 S_1 S_{(2+3)} \\ l_3 C_{(2+3)} \end{bmatrix},$$

Maintenant, la forme finale de la matrice jacobienne deviendra comme indiqué ci-dessous :

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -l_2 S_1 C_2 - l_3 S_1 C_{(2+3)} & -l_2 S_2 C_1 - l_3 C_1 S_{(2+3)} & -l_3 C_1 S_{(2+3)} \\ l_2 C_1 C_2 + l_3 C_1 C_{(2+3)} & -l_2 S_2 S_1 - l_3 S_1 S_{(2+3)} & -l_3 S_1 S_{(2+3)} \\ 0 & l_3 C_{(2+3)} + l_2 C_2 & l_3 C_{(2+3)} \\ 0 & S_1 & S_1 \\ 0 & -C_1 & -C_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### IV.5.2.2 Modèle cinématique inverse (MCI)

L'objectif de la cinématique inverse est de déterminer les vitesses articulaires  $\dot{\mathbf{q}}$  correspondant à une configuration  $\mathbf{q}$  donnée, permettant ainsi d'atteindre une vitesse opérationnelle  $\mathbf{X}$  prédéterminée pour le repère terminal

On peut écrire le modèle cinématique inverse sous la forme :

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

Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique directe, la mise en œuvre peut être faite de façon analytique ou numérique :

La solution analytique a pour avantage de diminuer considérablement le nombre d'opération, mais on doit traiter tous les cas singuliers.

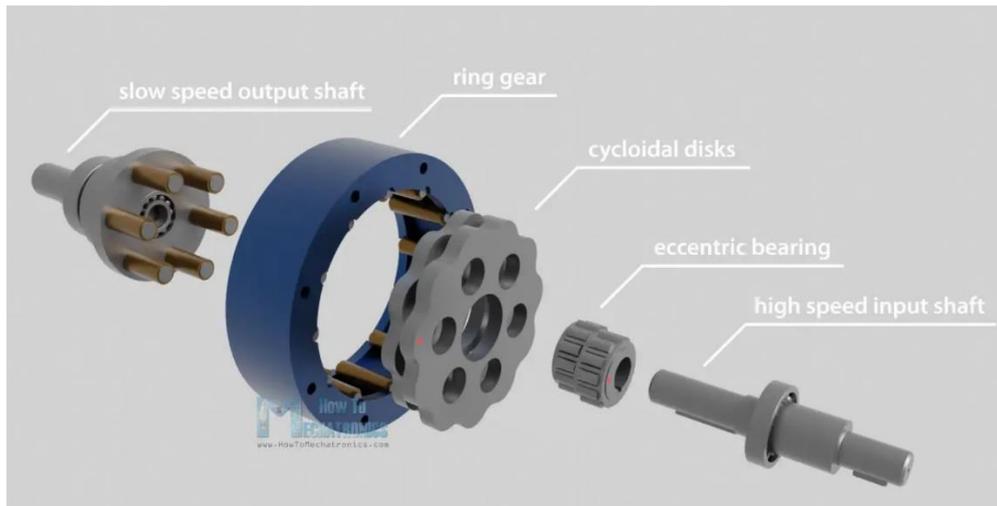
Les méthodes numériques sont plus générales, la plus répandue étant fondée sur la notion de pseudo-inverse, les algorithmes traitent de façon unifiée les cas réguliers, singuliers et redondants ; elles nécessitent un temps de calcul relativement important.

## IV.6 Conception de Robot

La conception du modèle 3D du robot sera réalisée sur **SolidWorks**. Nous créerons les différentes parties du robot, y compris un **réducteur 19:1**, une **base**, des **articulations**, **deux bras**, et **la torche de soudage**. Les images finales seront rendues à l'aide de **KeyShot** pour une visualisation réaliste.

### IV.6.1 Conception de Réducteurs

Un réducteur cycloïdal est composé de cinq éléments principaux : un arbre d'entrée à haute vitesse, un roulement excentrique, deux disques cycloïdaux, une couronne dentée avec des axes et des rouleaux, et un arbre de sortie à basse vitesse avec des axes et des rouleaux.



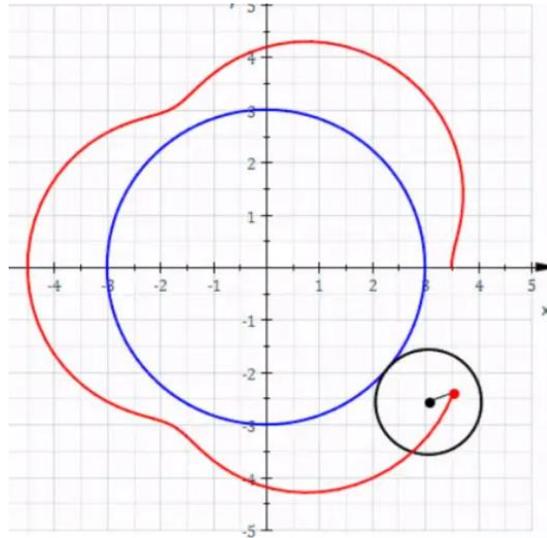
**Figure IV-4:**Composition d'un Réducteur Cycloïdal [30]

L'arbre d'entrée entraîne le roulement excentrique, qui à son tour fait tourner les deux disques autour de la circonférence interne du carter de la couronne dentée. Le mouvement excentrique fait en sorte que les dents ou lobes des disques cycloïdaux s'engrènent avec les rouleaux du carter de la couronne dentée, produisant ainsi une rotation inversée à une vitesse réduite. Le rapport de réduction dépend du nombre de broches sur la couronne dentée.



**Figure IV-5:**Fonctionnement d'un Réducteur Cycloïdal [30]

Le profil du disque cycloïdal provient d'une cycloïde, qui est une courbe tracée par un point lorsqu'il roule le long d'une ligne droite sans glisser. En réalité, il s'agit d'une variante, l'épi trochoïde, qui est une courbe tracée par un point roulant sur la circonférence d'un cercle, à une certaine distance du centre de ce cercle extérieur.



**Figure IV-6:** Courbe Épi trochoïdale [30]

Pour dessiner une telle courbe, nous pouvons utiliser les équations paramétriques suivantes : [31]

$$X = (R \cdot \cos(t)) - (Rr \cdot \cos(t + \arctan(\frac{\sin((1-N) \cdot t)}{(R/(E \cdot N)) - \cos((1-N) \cdot t)}))) - (E \cdot \cos(N \cdot t))$$

$$Y = (-R \cdot \sin(t)) + (Rr \cdot \sin(t + \arctan(\frac{\sin((1-N) \cdot t)}{(R/(E \cdot N)) - \cos((1-N) \cdot t)}))) + (E \cdot \sin(N \cdot t))$$

**Avec :**

Rapport de réduction.  $I = 19:1$

Nombre de rouleaux.  $N = 20$

Rayon du rouleau.  $Rr = 8/2 = 4$

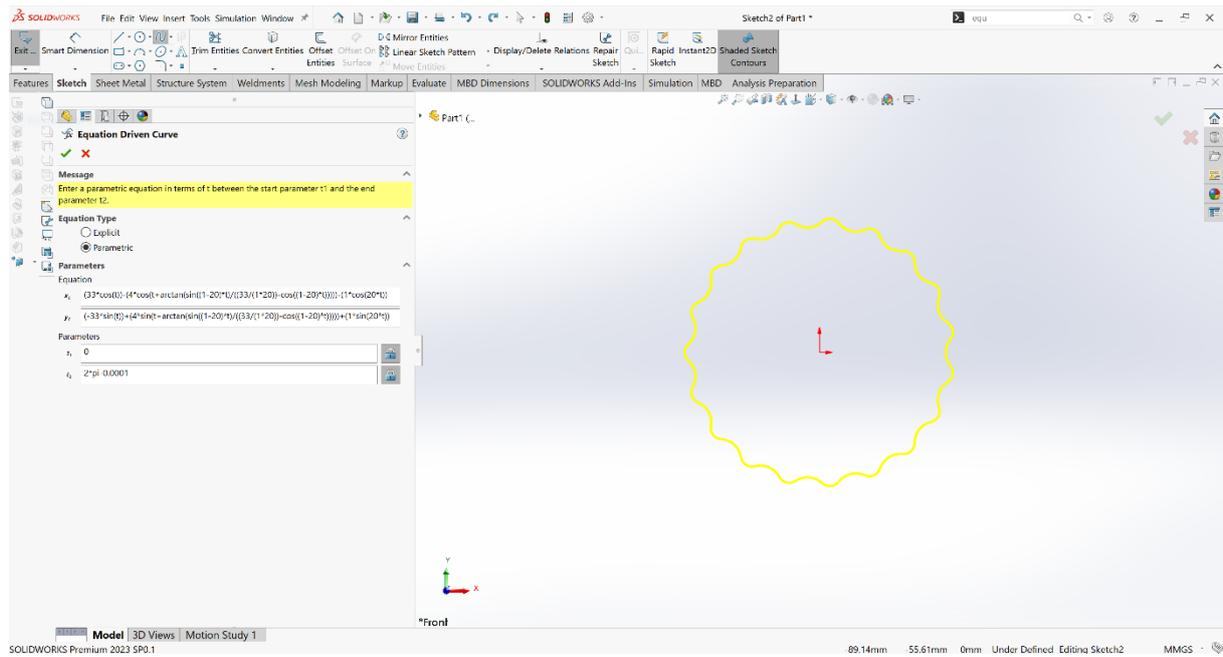
Rayon du diamètre primitif des rouleaux.  $R = 66/2 = 33$

Excentricité - décalage de l'arbre d'entrée vers un disque cycloïdal.  $E = 1$

**Donc :**

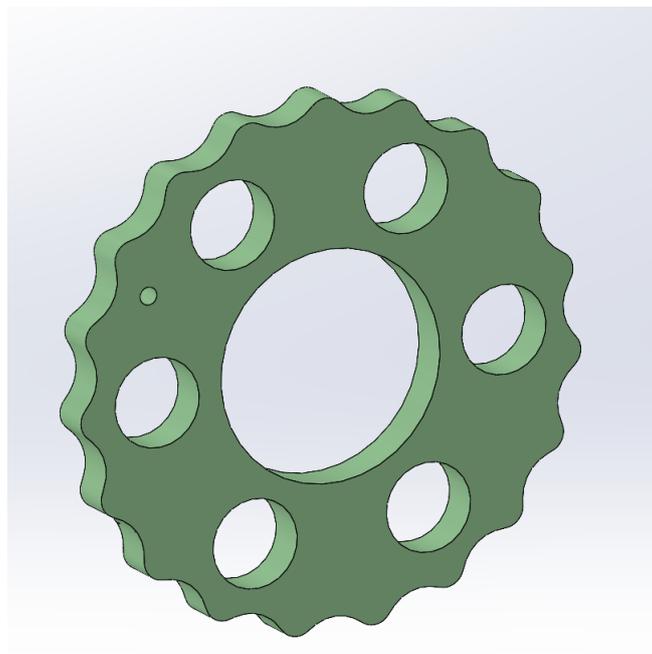
$$X = (33 \cdot \cos(t)) - (4 \cdot \cos(t + \arctan(\frac{\sin((1-20) \cdot t)}{(33/(1 \cdot 20)) - \cos((1-20) \cdot t)}))) - (1 \cdot \cos(20 \cdot t))$$

$$Y = (-33 \cdot \sin(t)) + (4 \cdot \sin(t + \arctan(\frac{\sin((1-20) \cdot t)}{(33/(1 \cdot 20)) - \cos((1-20) \cdot t)}))) + (1 \cdot \sin(20 \cdot t))$$



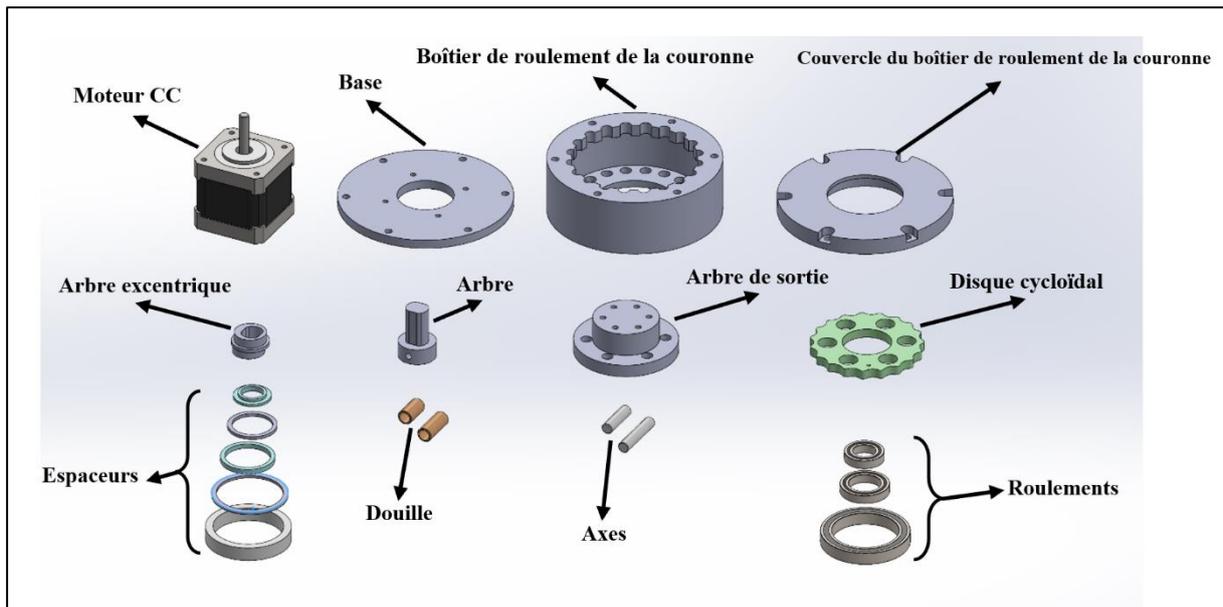
**Figure IV-7:**Équations Paramétriques dans SOLIDWORKS

Ensuite, nous pouvons simplement extruder le profil et réaliser les trous pour le roulement excentrique et les axes de sortie. Le diamètre de ces trous de sortie est égal au diamètre des rouleaux des axes plus deux fois l'excentricité. Dans ce cas, cela donne un diamètre de 10 mm ( $8 + 2*1$ ).



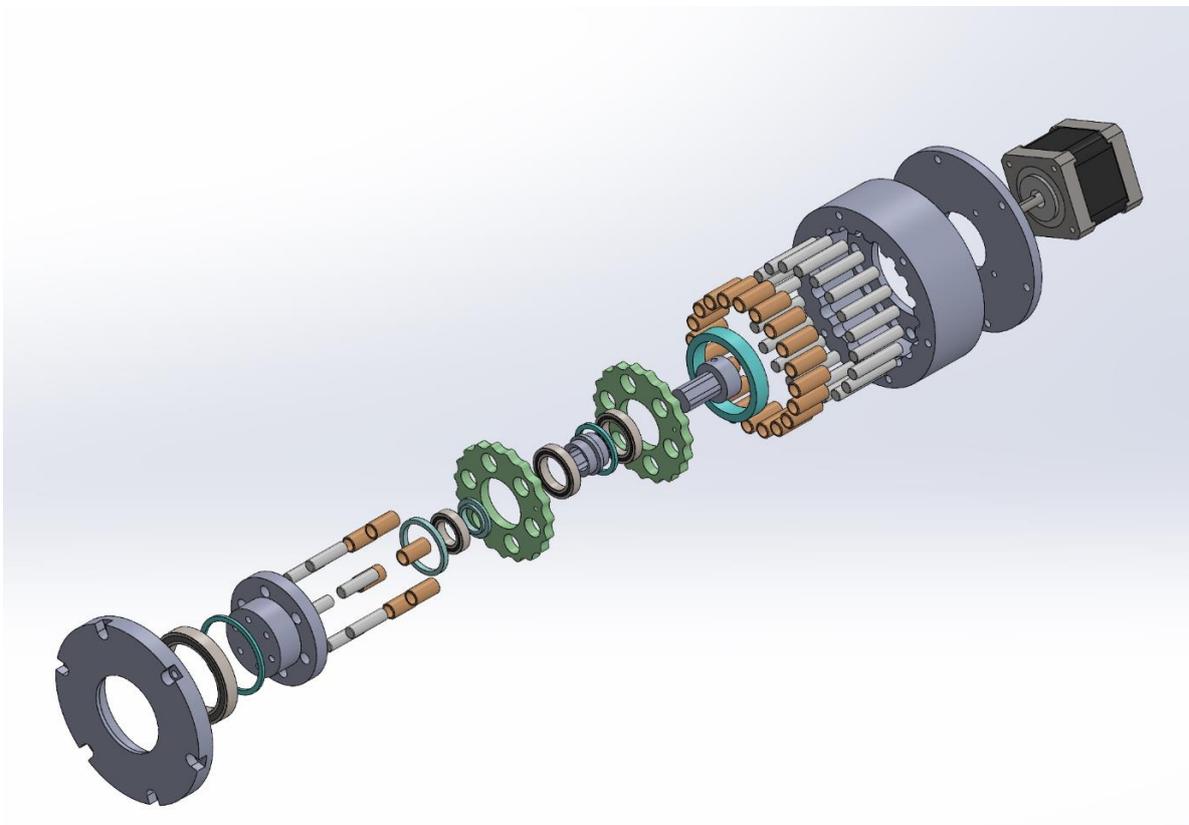
**Figure IV-8:**Disque cycloïdal

Après, nous procéderons à la modélisation des autres composants du réducteur.



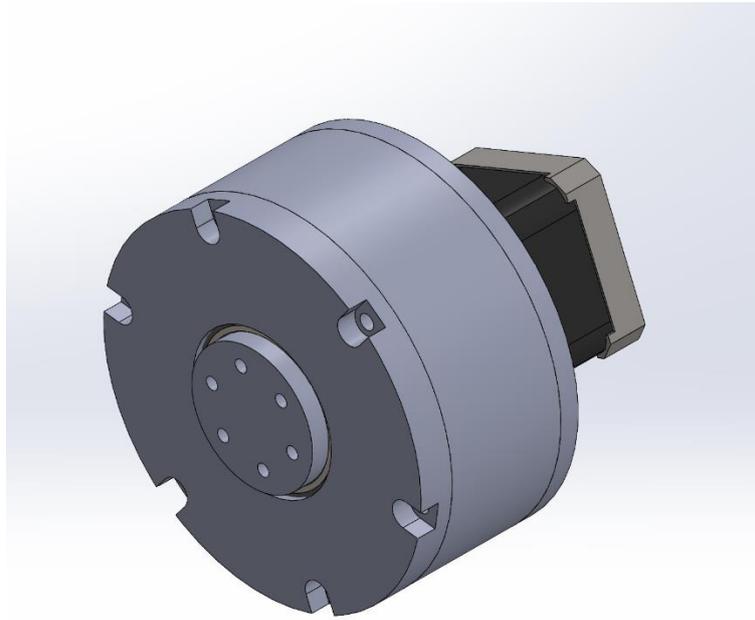
**Figure IV-9:** Pièces de réducteur cycloïdal

Maintenant, nous passons à l'assemblage du réducteur, en tenant compte de toutes les relations d'assemblage.

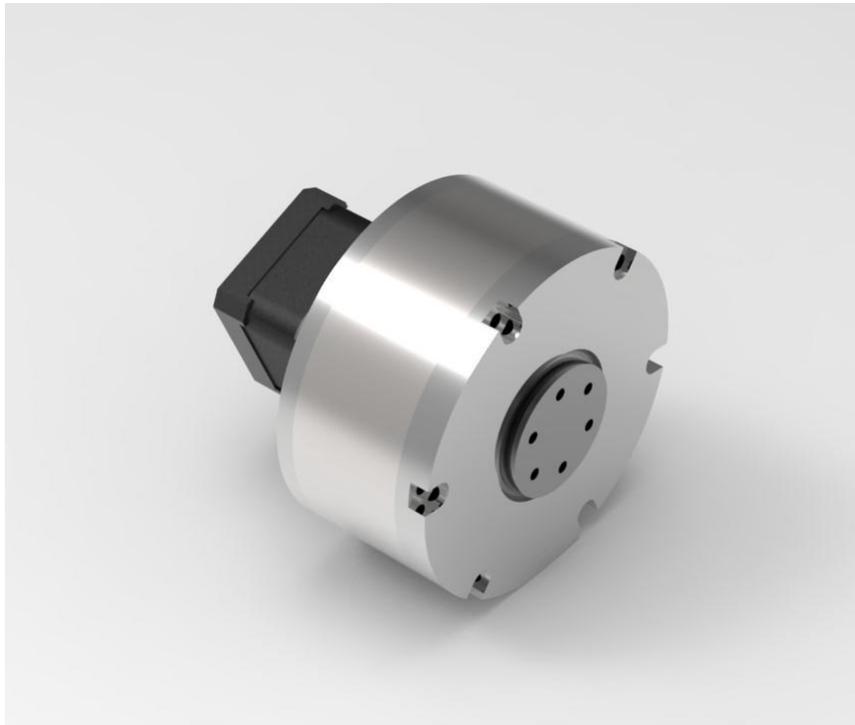


**Figure IV-10:** Vue Éclatée de l'Assemblage du Réducteur Cycloïdal

Nous avons terminé l'assemblage, ce qui donnera le résultat suivant :



**Figure IV-11:**Assemblage Finale



**Figure IV-12:**Réducteur cycloïdal

### IV.6.2 Base

Notre base est un assemblage de deux pièces : une base et un couvercle avec un trou au milieu, permettant de placer le réducteur à l'intérieur.

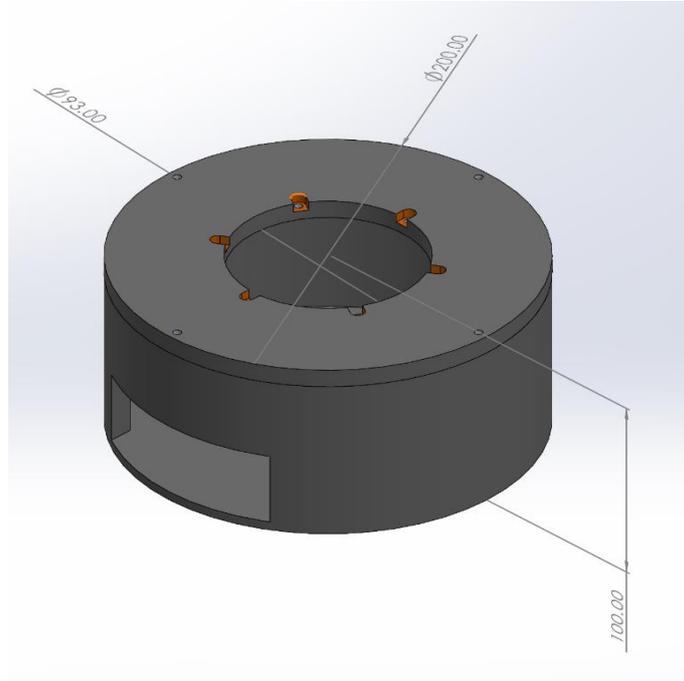


Figure IV-13: La Base

### IV.6.3 Articulations

Il y a deux boîtes d'encastrement : la première est pour le deuxième actionneur, composée de trois pièces, et l'autre est pour le troisième actionneur, composée de deux pièces.

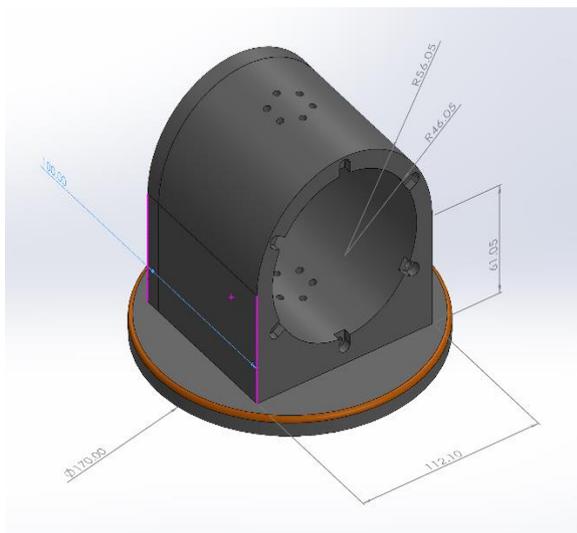


Figure IV-14 : Première articulation

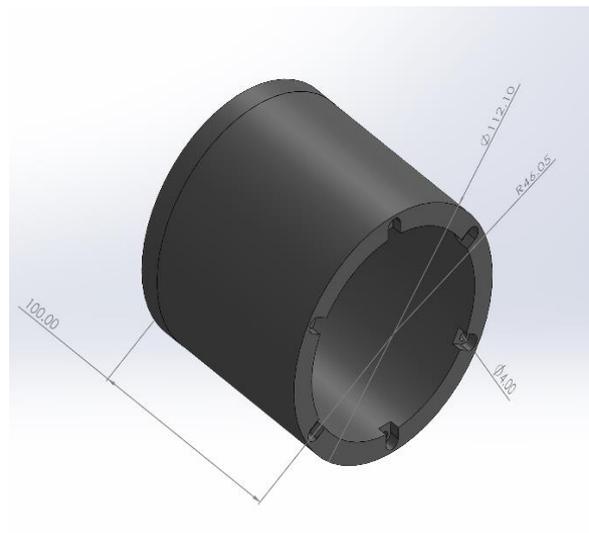


Figure IV-15 : Deuxième articulation

IV.6.4 Les Bras

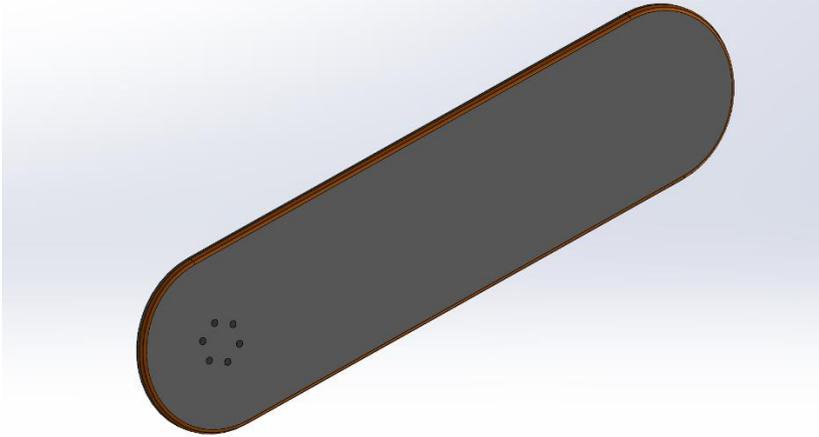


Figure IV-16 : Premier Bras

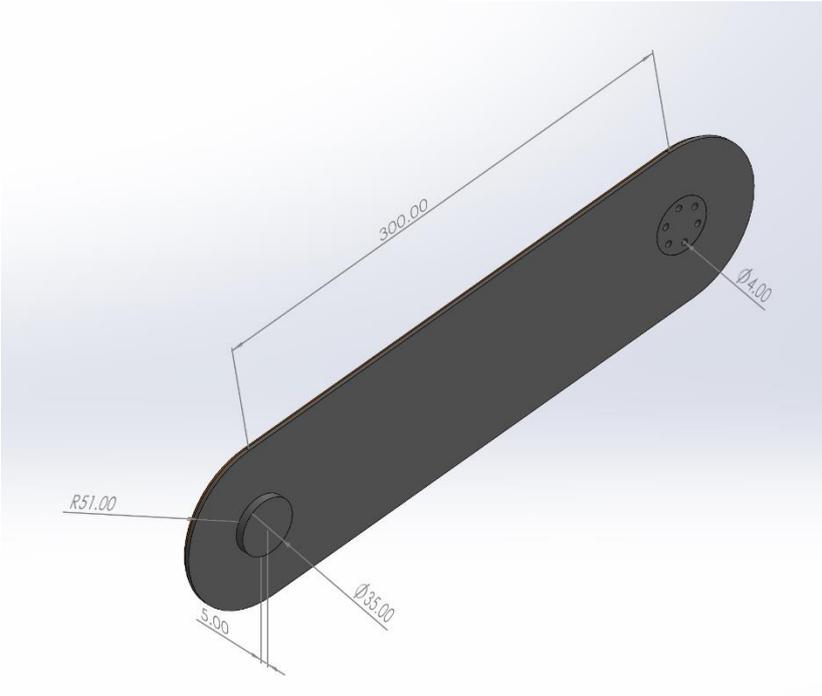
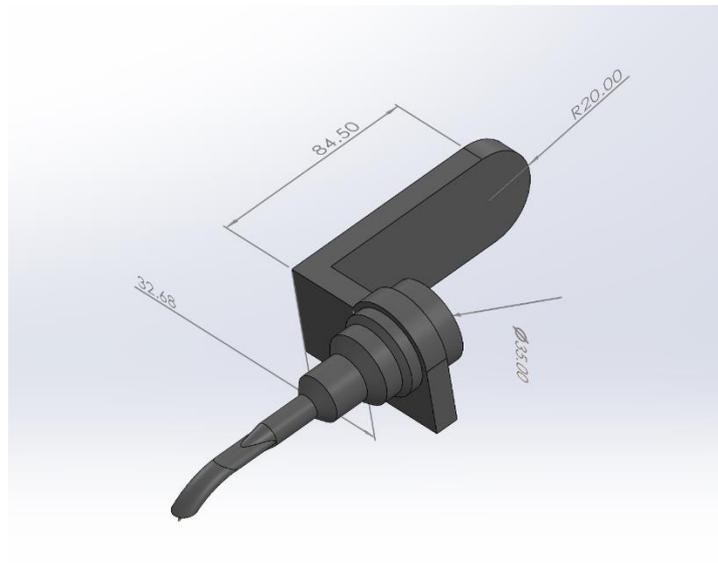


Figure IV-17:Deuxième Bras

### IV.6.5 Torche de soudage

Notre torche de soudage est un assemblage de deux pièces : une poignée et la torche.



**Figure IV-18:** Torche de soudage

### IV.6.6 Assemblage du Robot

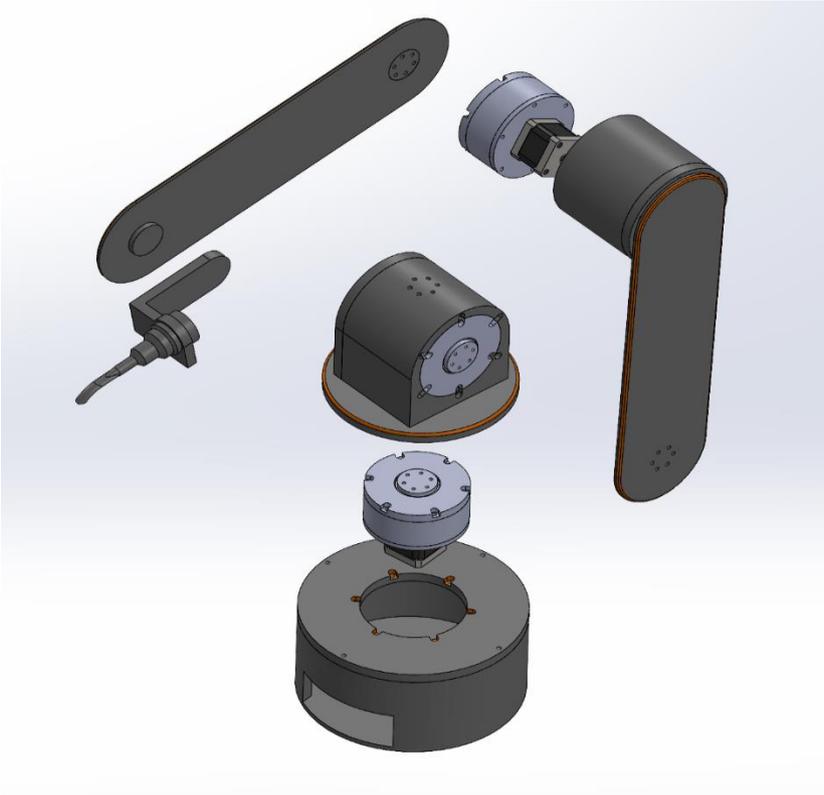
Nous commençons par importer la base dans SolidWorks et installer le premier actionneur avec le réducteur, puis les fixer en place.

Ensuite, nous positionnons la première boîte d'encastrement à la sortie du réducteur et la fixons solidement.

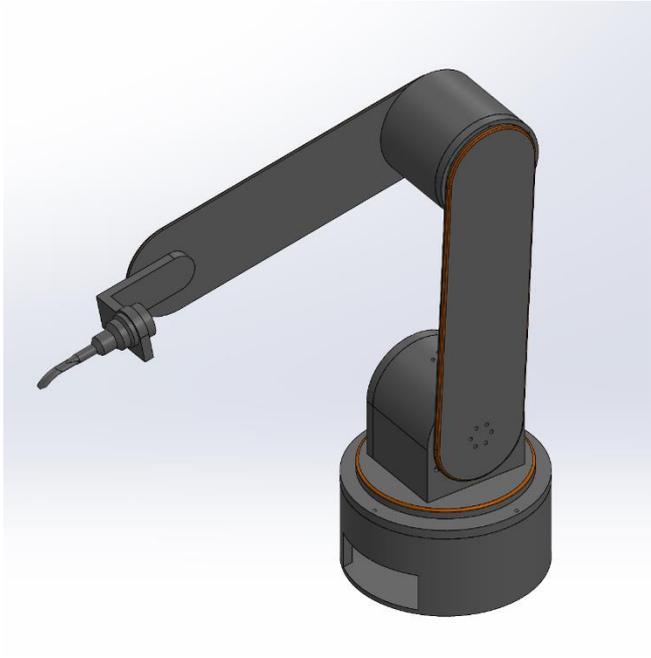
Une fois cette étape réalisée, nous apportons le deuxième actionneur avec son réducteur et les installons dans leur emplacement prévu à l'intérieur de la première boîte.

Nous attachons ensuite la deuxième boîte à l'extrémité du premier bras, puis nous fixons le bras à la sortie du deuxième réducteur. Nous plaçons ensuite le dernier actionneur à l'intérieur de la deuxième boîte.

Pour terminer, nous fixons la torche de soudage à l'extrémité du deuxième bras, puis attachons ce bras à la sortie du dernier réducteur.



**Figure IV-19:** Vue Éclatée de l'Assemblage du Robot



**Figure IV-20:** Assemblage final du Robot

Nous importons le modèle du robot dans **KeyShot** pour réaliser le rendu final du robot.

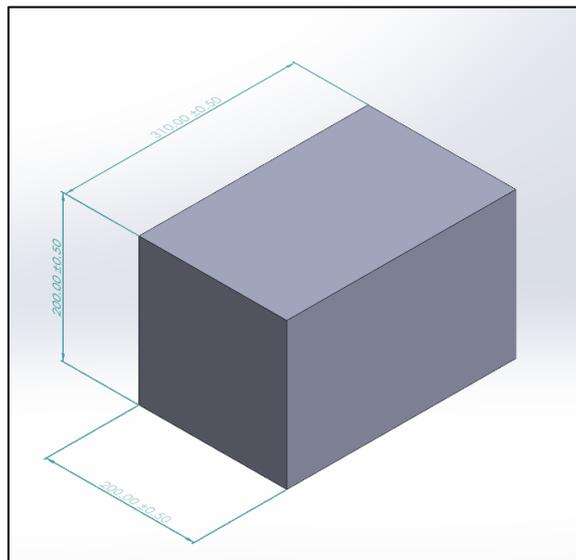


**Figure IV-21:** Robot a 3 DDL de Soudage

### IV.7 Simulation du Robot

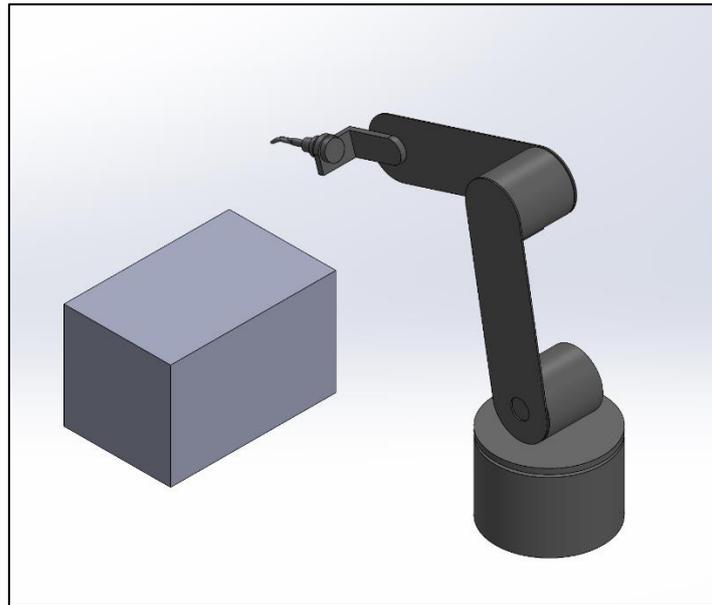
Pour la simulation, nous utiliserons **Matlab Simulink** et **Simscape**. Notre objectif est de faire en sorte que le robot soude selon une trajectoire désirée.

L'objet à souder est un **coffre-fort**.



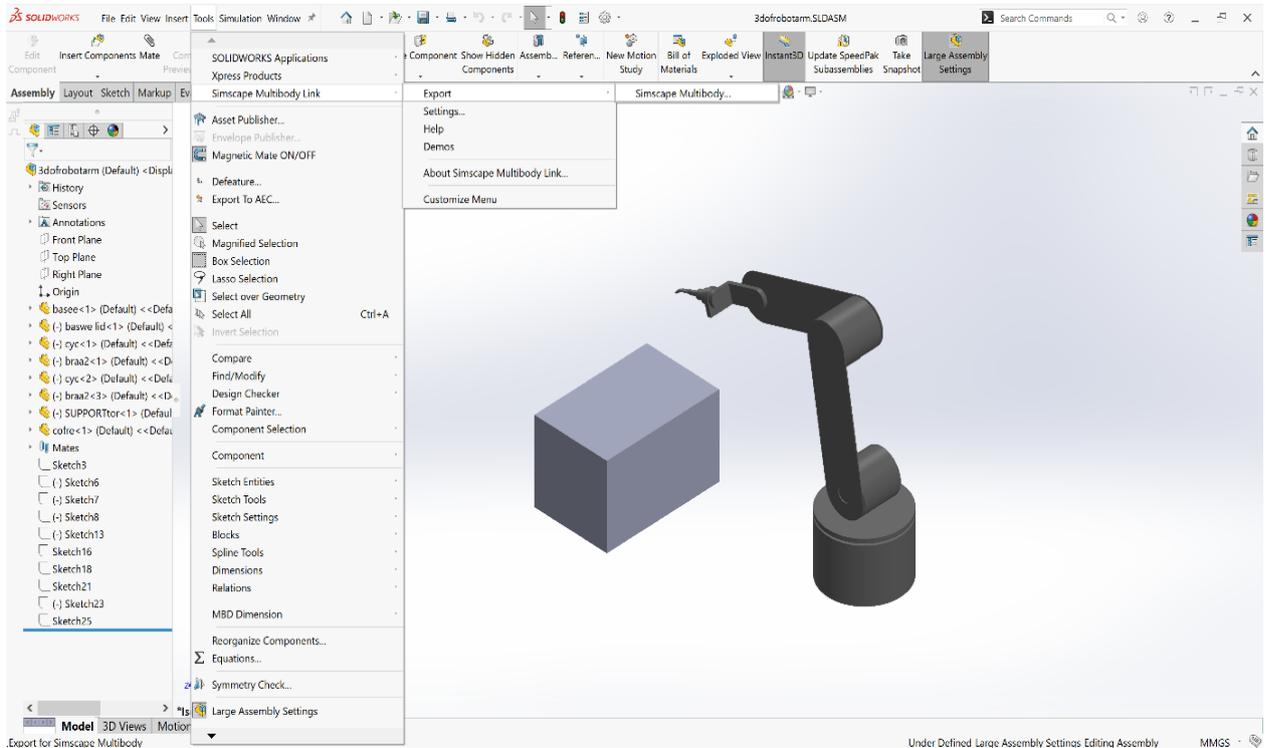
**Figure IV-22:** Coffre-fort

Nous importons le coffre-fort et le positionnons **parallèlement** à l'**origine** du robot, à une distance de **450 mm** à l'intérieur de l'**espace de travail** du robot.



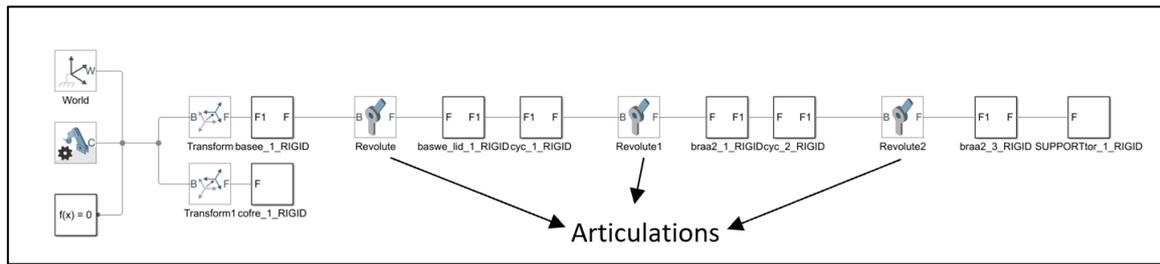
**Figure IV-23:**Robot de soudage avec le coffre-fort

Nous importons le robot et le coffre de **SolidWorks** vers **MATLAB** en utilisant le **plug-in SimScape Multibody Link**.



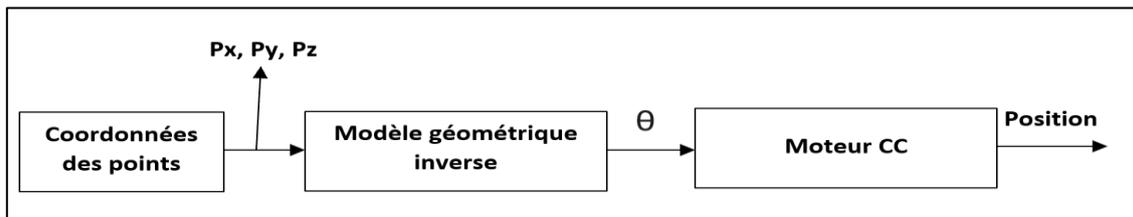
**Figure IV-24:** Importation du Robot depuis **SolidWorks** vers **MATLAB**

Nous ouvrons **MATLAB**, accédons au répertoire de fichiers du robot, puis, à l'aide de la fonction "**smimport**", nous importons notre robot.



**Figure IV-25:** Schéma bloc du robot sur **MATLAB**

Pour mener à bien notre simulation, nous avons besoin des actionneurs pour contrôler les mouvements du robot, ainsi que du modèle géométrique inverse pour convertir les coordonnées spatiales des points en angles requis pour commander les actionneurs.



**Figure IV-26:** Schéma d'intégration des actionneurs et du modèle géométrique inverse

## IV.7.1 Modélisation de moteur à courant continu

### IV.7.1.1 Constituant d'un moteur à courant continu

Cette catégorie des moteurs constitue principalement de deux composants essentiels :

**Le stator :** il est appelé aussi l'inducteur. C'est la partie fixe du moteur. Il a pour fonction de créer un champ magnétique reçu par les bobines du rotor. Il peut être constitué d'aimants permanents ou de bobines alimentées par un courant.

**Le rotor :** il est appelé aussi l'induit. Il représente la partie tournante du moteur. Il est constitué d'un enroulement de spires conductrices réunies en faisceaux, disposés de telle manière que lorsqu'un côté est soumis au pôle nord, l'autre est au pôle sud.

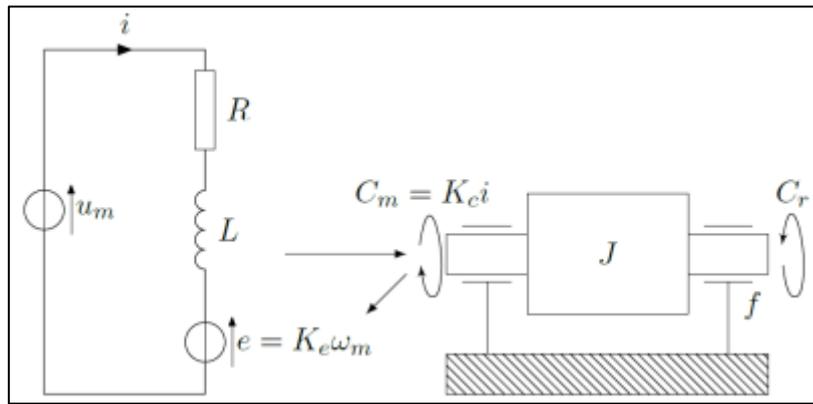


Figure IV-27: Circuit équivalent de moteur

- Equation électrique :

$$U = RI + E + L \frac{di}{dt}$$

Avec :  $E = k\phi\Omega$

En passant en Laplace :

$$U(s) = RI(s) + E(s) + Ls I(s)$$

$$\underbrace{U(s) - E(s)}_{\text{comparateur}} = (Ls + R)I$$

$$\epsilon_1(s) = (Ls + R)I$$

$$H_1(s) = \frac{I(s)}{\epsilon_1(s)} = \frac{1}{LS+R}$$

D'autre part :

$$E = k\phi\Omega \rightarrow H_2(s) = \frac{E}{\Omega} = k\phi$$

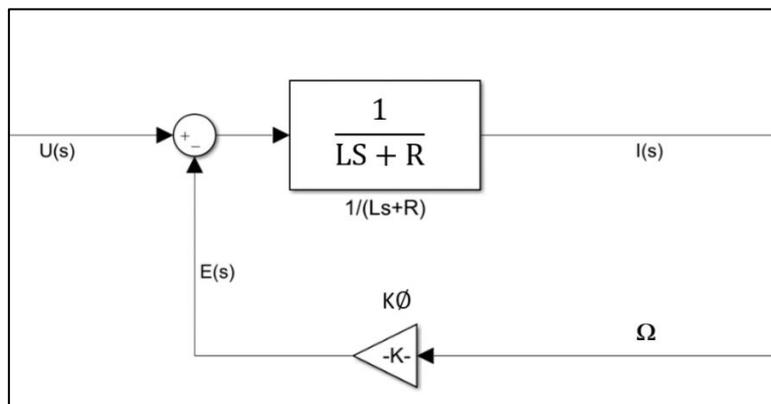


Figure IV-28: Schéma bloc de la partie électrique

- Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - f\Omega - T_r$$

Avec :  $T_{em} = k\phi I$

En passant en Laplace :

$$Js\Omega(s) = T_{em} - f\Omega(s) - T_r$$

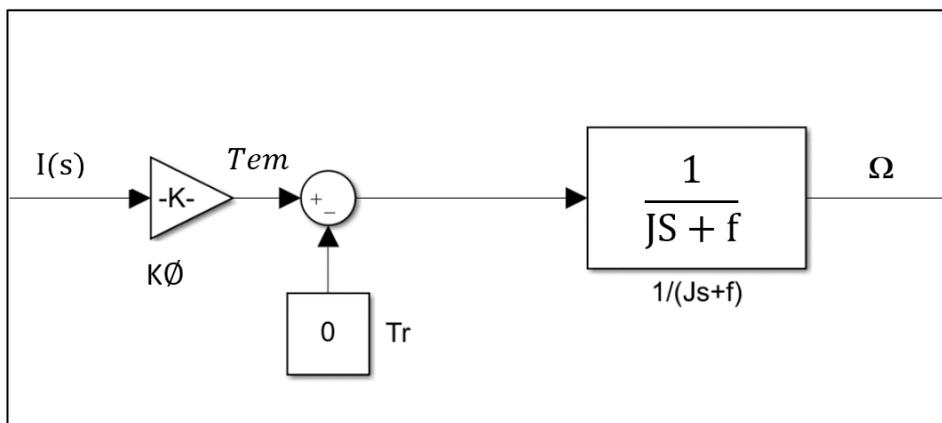
$$\underbrace{T_{em} - T_r}_{\text{comparateur}} = (Js + f)\Omega(s)$$

$$\varepsilon_2(s) = (Js + f)\Omega(s)$$

$$H_3(s) = \frac{\Omega(s)}{\varepsilon_2(s)} = \frac{1}{(Js + f)}$$

D'autre part :

$$T_{em} = K\phi I \rightarrow H_4(s) = \frac{T_{em}}{I} = k\phi$$



**Figure IV-29:** Schéma bloc de la partie mécanique

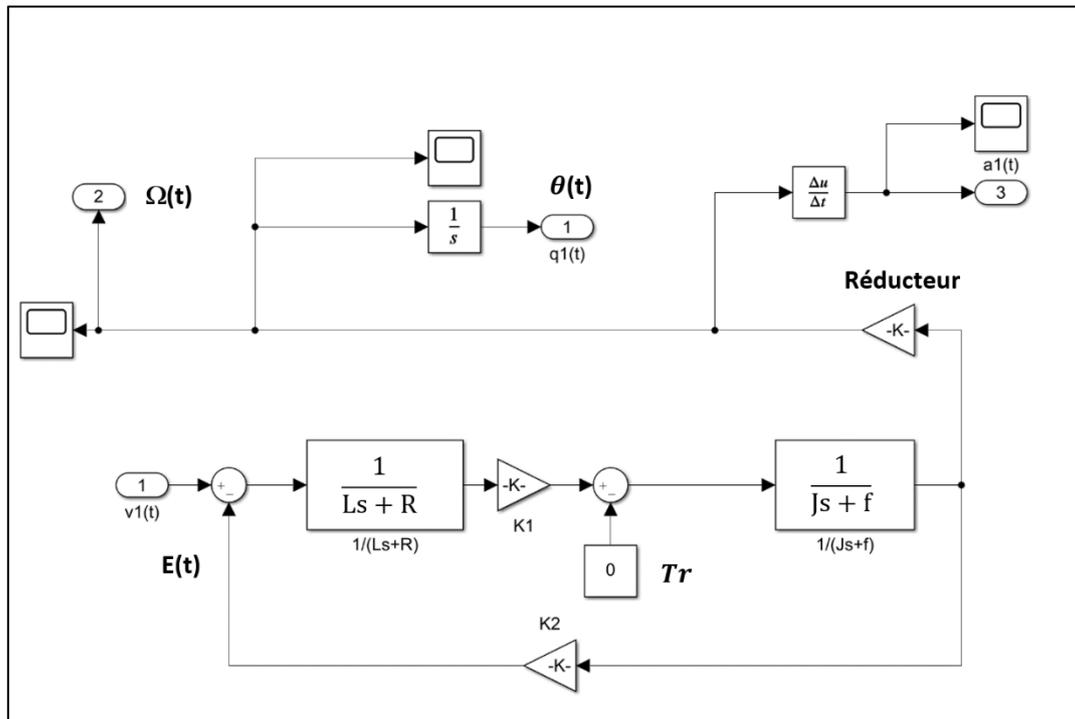


Figure IV-30: Schéma bloc de Moteur CC

- La fonction de transfert du moteur CC :

On suppose  $T_r = 0$

$$U(s) = E(s) + (Ls + R) I(s)$$

$$U(s) = k\phi\Omega + (Ls + R) \frac{T_{em}}{k\phi} (s)$$

$$U(s) = k\phi\Omega + (Ls + R) \frac{(Js + f)}{k\phi} \Omega(s)$$

$$U(s) = \left(k\phi + \frac{(Ls+R)+(Js+f)}{k\phi}\right)\Omega(s)$$

$$U(s) = \left(\frac{(k\phi)^2 + RJs + Rf + JJs^2 + Lsf}{k\phi}\right)\Omega(s)$$

$$U(s) = \left(\frac{(k\phi)^2 + RJs + Rf + JJs^2 + Lsf}{k\phi}\right)\Omega(s)$$

$$U(s) = \left(\frac{JJs^2 + (JR + Lf)s + (k\phi)^2 + Rf}{k\phi}\right)\Omega(s)$$

$$G_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k\phi}{JJs^2 + (JR + Lf)s + (k\phi)^2 + Rf}$$

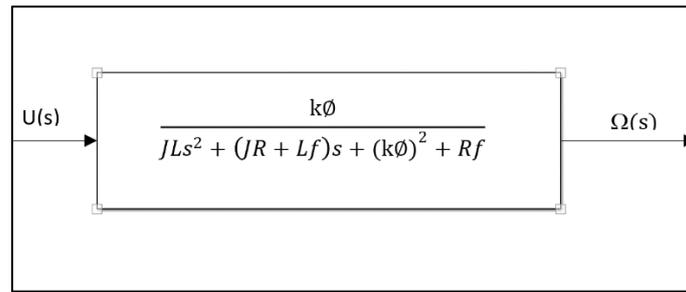


Figure IV-31: Fonction de Transfert de Moteur CC

Avec :

$$R = 8.13 \Omega$$

$$L = 0.085 \text{ H}$$

$$J = 0.03 \text{ Nm}^2$$

$$f = 0.4 \text{ N}$$

$$K\phi = 0.043$$

## IV.7.2 Commande de Moteur CC

### IV.7.2.1 Commande on boucle ouverte

Nous plaçons notre moteur dans un Subsystem et lui appliquons un signal d'entrée.

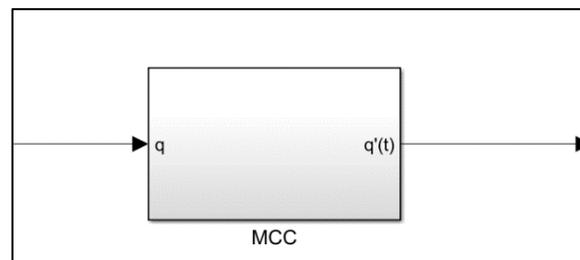


Figure IV-32: Commande on boucle ouverte

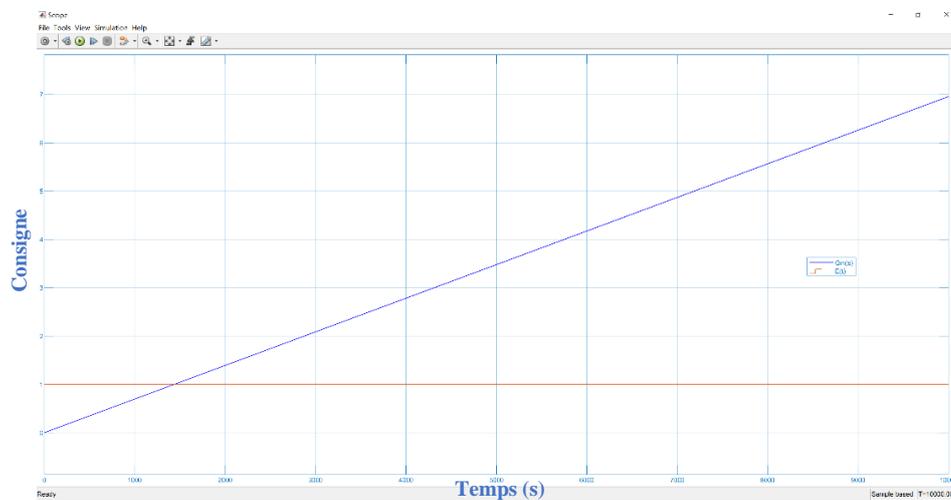


Figure IV-33 : Réponse indicielle du système on boucle ouvert

Nous remarquons que la réponse indicielle tend vers l'infini et dépasse notre valeur désirée, rendant ce système instable et inutilisable.

### IV.7.2.2 Commande on Boucle fermée

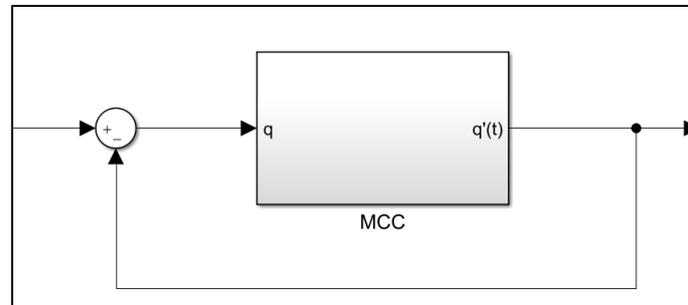


Figure IV-34 : Commande en boucle fermée

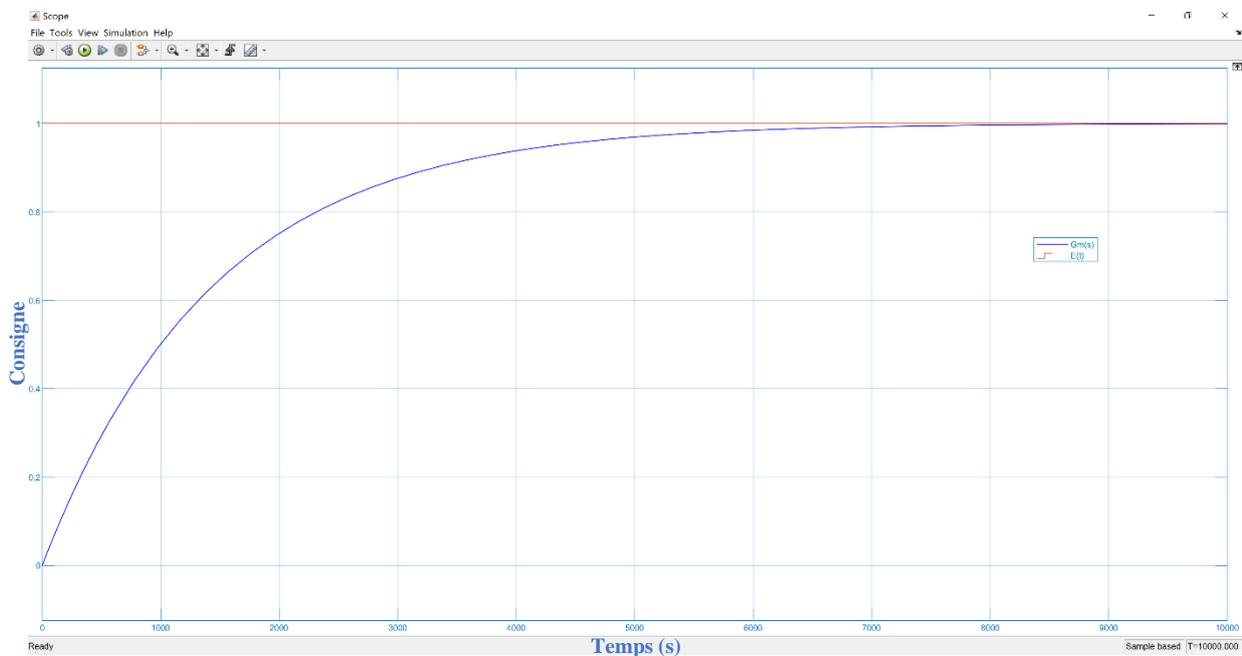


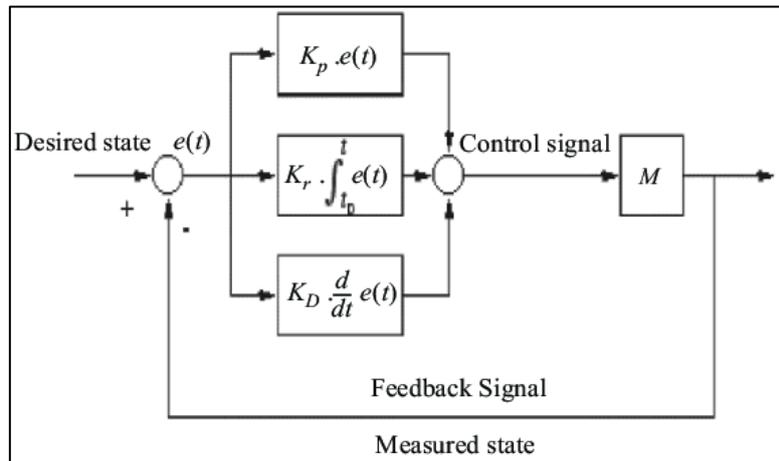
Figure IV-35 : Réponse indicielle du system on boucle fermée

Nous observons que la réponse indicielle converge vers la valeur désirée, ce qui rend le système stable et utilisable, mais avec un temps de réponse très long (plus de 4000 secondes). Pour remédier à cela, nous allons utiliser un **correcteur PID**.

### IV.7.3 Correcteur PID

Le **régulateur PID**, appelé aussi **correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé)** est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-

à-dire un système ou procédé en **boucle fermée**. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.



**Figure IV-36:** Schéma bloc d'un contrôleur PID

### IV.7.3.1 Rôle du correcteur

Élaborer le signal de commande approprié à partir du signal d'erreur.

#### a) Correcteurs usuels :

##### - Correction Proportionnelle [P] :

Le correcteur proportionnel agit en amplifiant l'erreur avec un gain spécifique  $K_c$ . Son objectif est d'accroître l'impact de l'erreur sur le système, ce qui permet d'accélérer sa réaction.

Fonction de transfert : C'est un gain  $K_c$  :  $C(s) = K_c$

Commande du système :  $u(t) = K_c \varepsilon(t)$

**Effets :** modification du gain du système en Boucle Ouvert

- Si  $K_c > 1$  : amélioration de la précision du système en BF.
- Si  $K_c < 1$  : diminution de la précision du système en BF.

##### - Correction PI :

Dans un système de contrôle proportionnel intégral (PI), l'intégrateur (I) est ajouté au contrôle proportionnel (P). Cette configuration, vise à éliminer l'erreur statique et de rendre

le système assez stable au régime permanent. L'intégrateur agit en accumulant l'erreur dans le temps et en la multipliant par un gain  $K_i$ . Cela permet de corriger les erreurs continues et d'assurer une réponse précise et stable du système.

$$\text{Fonction de transfert : } C(s) = K_c + \frac{K_i}{s} = K_c + \frac{K_c}{T_i s}$$

Avec :  $T_i$  est la constante d'intégration

$$\text{Commande du système : } u(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

**Effets :**

- Améliorer la précision
- Annuler Erreur statique
- Diminue la stabilité
- Ralenti le système

- **Correction PID :**

Pour réaliser un régulateur PID, on ajoute le terme dérivé, qui consiste à dériver l'erreur en la multipliant par un gain  $K_d$ . Sa principale fonction est de limiter le dépassement généré par l'intégrateur.

$$\text{Fonction de transfert : } K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] = K_c \frac{(T_i T_d) s^2 + T_i s + 1}{T_i s}$$

$$\text{Commande du système : } u(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c T_d \frac{d \varepsilon(t)}{dt}$$

- **Effets :**
  - **L'action I** : amélioration de la précision
  - **L'action D** : amélioration de la stabilité
  - **L'action P** : amélioration de la rapidité

### IV.7.3.2 Choix de correcteur

Nous choisissons un régulateur Proportionnel Intégral (**PI**) en raison de son équilibre entre performance et simplicité.

Le correcteur PI est le plus utilisé en pratique ou ses contributions à la précision et à la robustesse du système asservi sont particulièrement appréciées.

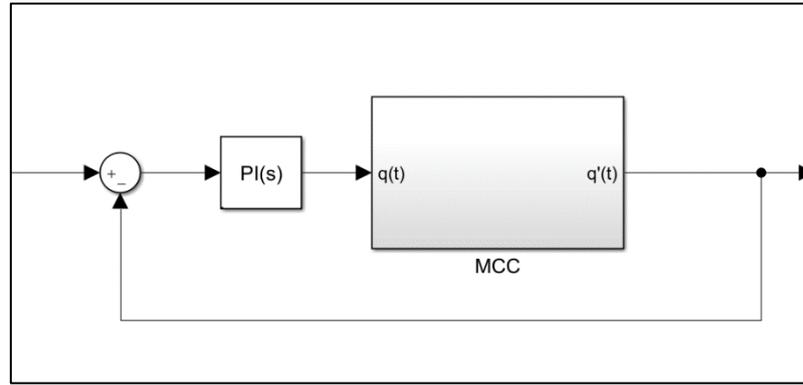


Figure IV-37 : Schéma bloc de moteur CC avec un correcteur PI

### IV.7.3.3 Calcul des paramètres de correcteur PI

On utilise la méthode de compensation des pôles.

$$C(s) = \frac{k_c T_i s + k_c}{T_i s} = k_c \left[ \frac{1 + T_i s}{T_i s} \right]$$

$$FTBO = C(s) * G_m(s)$$

$$FTBO = k_c \left[ \frac{1 + T_i s}{T_i s} \right] * \frac{k\phi}{JLs^2 + (JR + Lf)s + (k\phi)^2 + Rf}$$

$$G_m(s) = \frac{\frac{k\phi}{((k\phi)^2 + Rf)}}{\left[ \frac{JL}{(k\phi)^2 + Rf} \right] + \left[ \frac{JR + Lf}{(k\phi)^2 + Rf} \right] s + 1}$$

$$G_m(s) = \frac{\left( \frac{JR + Lf}{k\phi} \right) * \frac{k\phi}{((k\phi)^2 + Rf)}}{\left( \frac{JR + Lf}{k\phi} \right) * \left[ \frac{JL}{(k\phi)^2 + Rf} \right] s^2 + \left[ \frac{JR + Lf}{(k\phi)^2 + Rf} \right] s + 1}$$

$$G_m(s) = \frac{\frac{JR + Lf}{((k\phi)^2 + Rf)}}{\left( \frac{JR + Lf}{k\phi} \right) * \left[ \frac{JL * \frac{1}{L}}{((k\phi)^2 + Rf) * \frac{1}{L}} \right] s^2 + \left[ \frac{JR + Lf}{(k\phi)^2 + Rf} \right] s + 1}$$

$$G_m(s) = \frac{\frac{JR + Lf}{((k\phi)^2 + Rf)}}{\left( \frac{JR + Lf}{k\phi} \right) * \left[ \frac{J * (R + \frac{Lf}{J})}{((k\phi)^2 + Rf) * \frac{1}{L} * (R + \frac{Lf}{J})} \right] s^2 + \left[ \frac{JR + Lf}{(k\phi)^2 + Rf} \right] s + 1}$$

$$G_m(s) = \frac{\frac{JR+Lf}{((k\emptyset)^2+Rf)}}{\left(\frac{JR+Lf}{k\emptyset}\right) * \left[\frac{JR+Lf}{((k\emptyset)^2+Rf)} * \frac{JL}{RJ+Lf}\right] s^2 + \left[\frac{JR+Lf}{(k\emptyset)^2+Rf}\right] s + 1}$$

On met :

$$T = \left(\frac{JR+Lf}{k\emptyset}\right), \quad T_1 = \frac{JR+Lf}{((k\emptyset)^2+Rf)}, \quad T_2 = \frac{JL}{RJ+Lf}$$

Donc :

$$G_m(s) = \frac{T_1 s}{T[T_1 T_2 s^2 + T_1 s + 1]}$$

Il est clair que pour la fonction soit correct :

$$T_1 \gg T_2 \rightarrow T_1 + T_2 \approx T_1$$

Donc :

$$(1 + T_1 s)(1 + T_2 s) = T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1 \approx T_1 T_2 s^2 + T_1 s + 1$$

D'où :

$$G_m(s) = \frac{T_1 s}{T[(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)]}$$

$$FTBO = k_c \left[ \frac{1 + T_i s}{T_i s} \right] * \frac{T_1 s}{T[(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)]}$$

$T_1 \gg T_2$  donc : le pole dominant est  $T_1$

$$\text{Donc : } T_i = T_1 = \frac{JR+Lf}{((k\emptyset)^2+Rf)}$$

$$FTBO = k_c \left[ \frac{1 + T_1 s}{T_1 s} \right] * \frac{T_1 s}{T[(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)]}$$

$$FTBO = \frac{k_c T_1 s}{T T_1 s (1 + T_2 s)}$$

Fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{k_c T_1 s}{T T_1 s (1 + T_2 s)}}{1 + \frac{k_c T_1 s}{T T_1 s (1 + T_2 s)}} = \frac{k_c T_1 s}{T T_1 s (1 + T_2 s) + k_c T_1 s}$$

$$FTBF = \frac{1}{\frac{T T_1 s}{k_c T_1 s} + \frac{T T_1 T_2 s^2}{k_c T_1 s} + 1}$$

Et comme :  $T_1 \gg T_2$  :  $\frac{T T_1 T_2 s^2}{k_c T_1 s} \approx 0$

$$FTBF = \frac{1}{\left(\frac{T}{k_c}\right) s + 1}$$

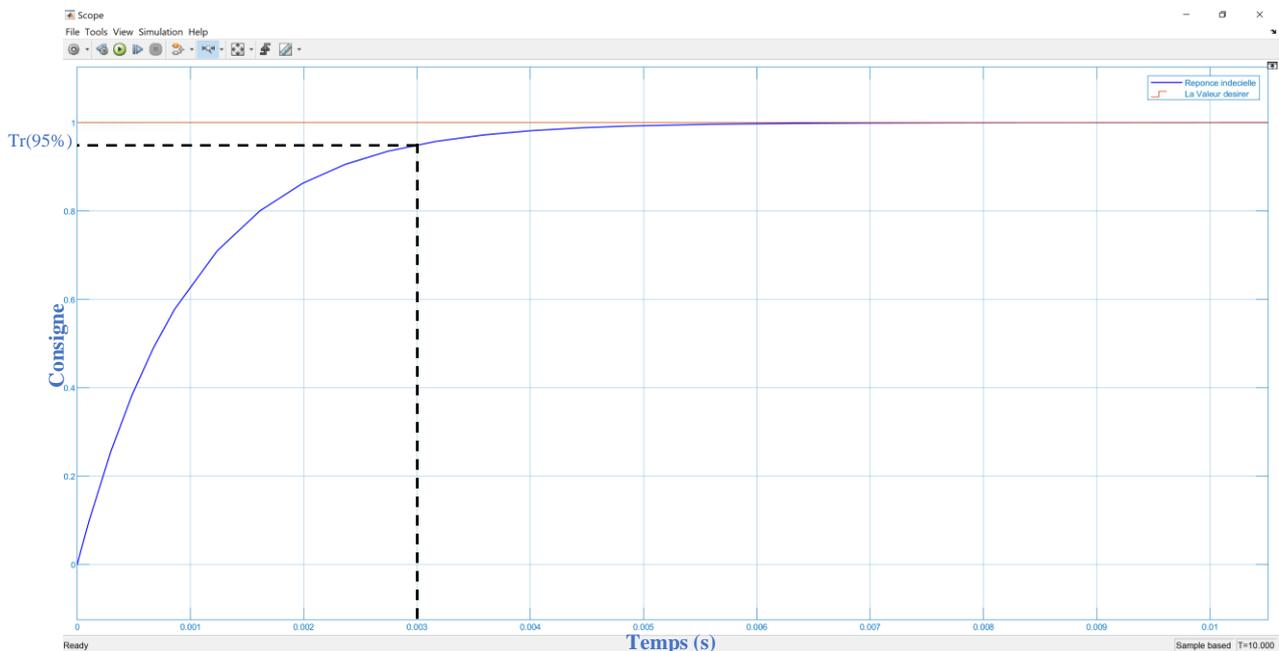
De la forme canonique :  $\frac{1}{\tau s + 1}$

C'est un système du 1<sup>er</sup> ordre Avec :  $\tau = \left(\frac{T}{k_c}\right)$

**Le temps de réponse** : on souhaite atteindre un temps de réponse **3 ms**

$$t_r = 3\tau = 3\left(\frac{T}{k_c}\right) \rightarrow k_c = \frac{3T}{t_r}$$

$$\begin{cases} T_i = \frac{JR + Lf}{((k\phi)^2 + Rf)} = \mathbf{0.08540654468} \\ k_c = \frac{3}{t_r} \left(\frac{JR + Lf}{k\phi}\right) = \mathbf{6462.8} \end{cases}$$



**Figure IV-38** : Réponse indicielle de MCC avec le correcteur PI pour 3ms

#### IV.7.4 Modélisation de MGI

Nous modélisons nos équations[IV.4], [IV.15], et [IV.21] dans Simulink et les plaçons dans un sous-système.

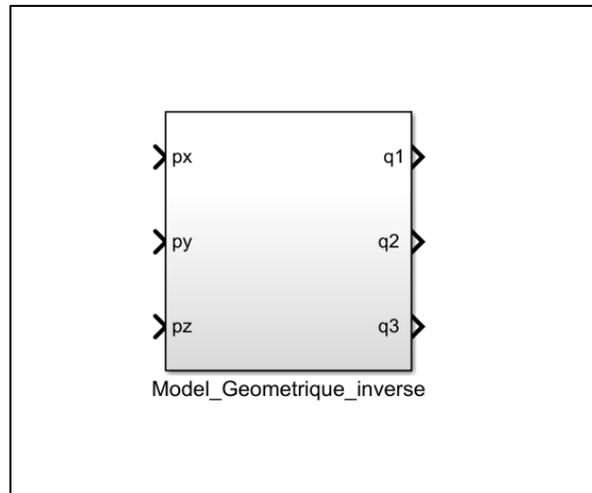


Figure IV-39 : Schéma bloc de MGI

#### IV.7.5 Définition de trajectoire

Notre trajectoire est une trajectoire linéaire de 200 mm

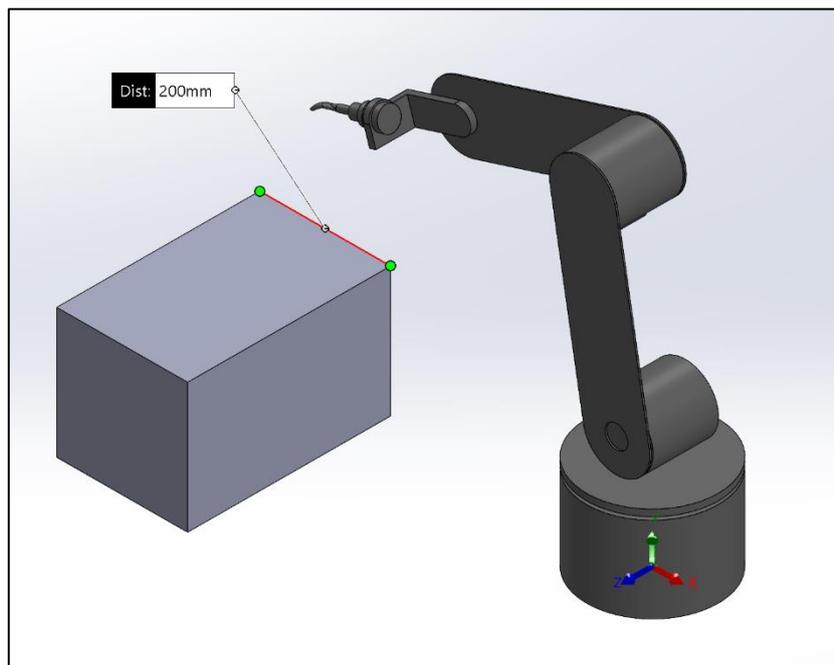


Figure IV-40 : Trajectoire désirée

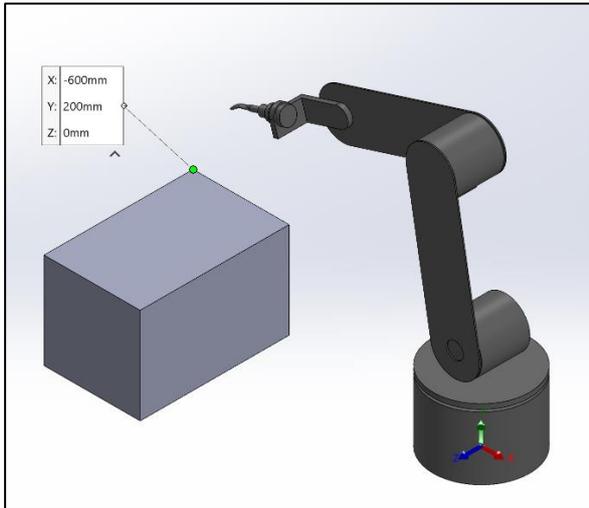


Figure IV-41 : Point de départ

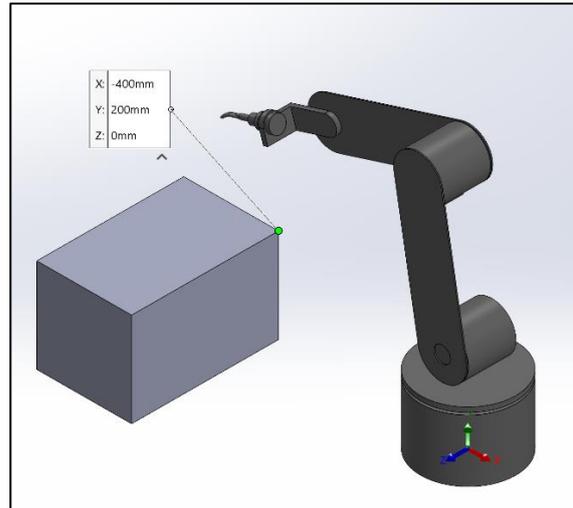


Figure IV-42 : Point d'arrivée

En gros, nous avons trois points : **0**, **A** et **B**.

**Point 0** : ( $P_x = -500$  ;  $P_y = 0$  ;  $P_z = 450$ )

**Point A** : ( $P_x = -600$  ;  $P_y = 0$  ;  $P_z = 200$ )

**Point B** : ( $P_x = -400$  ;  $P_y = 0$  ;  $P_z = 200$ )

Pour lancer la simulation, nous connectons tous les blocs nécessaires. En accédant aux propriétés du bloc de rotation par un double-clic, nous réglons le mouvement sur "**fourni par l'entrée**" et le couple sur "**calculé automatiquement**". Dans la section de détection, nous activons un **capteur de position**. Ensuite, nous connectons la sortie du moteur au bloc de rotation.

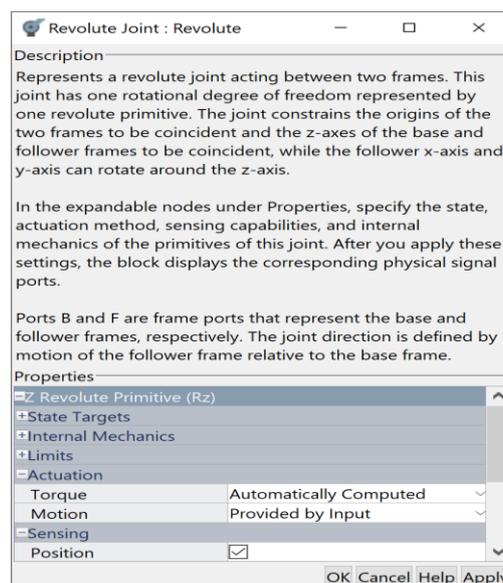


Figure IV-43 : Paramètres de bloc de rotation

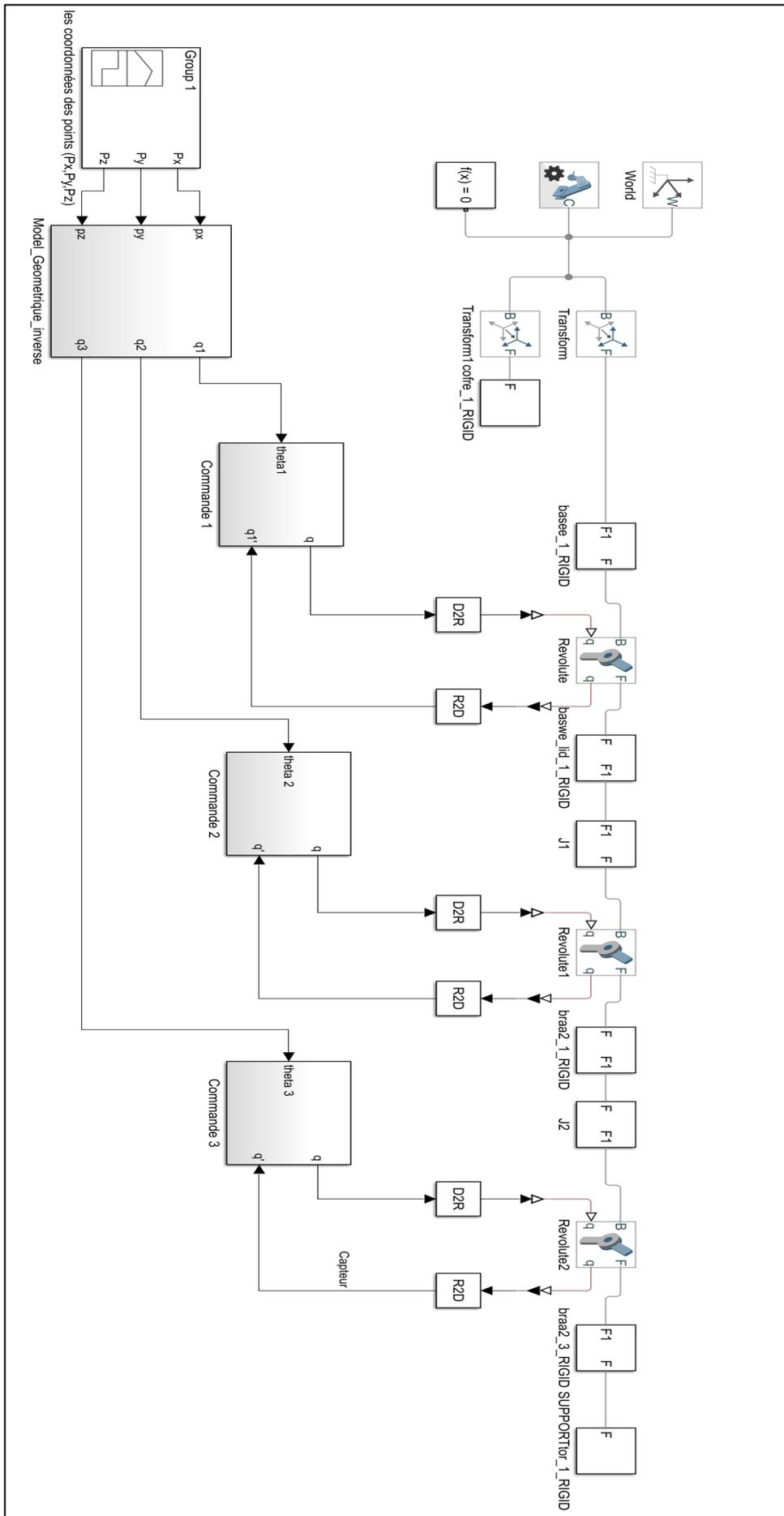


Figure IV-44: Schéma bloc final de simulation du Robot

IV.7.6 Visualisation des scopes de position

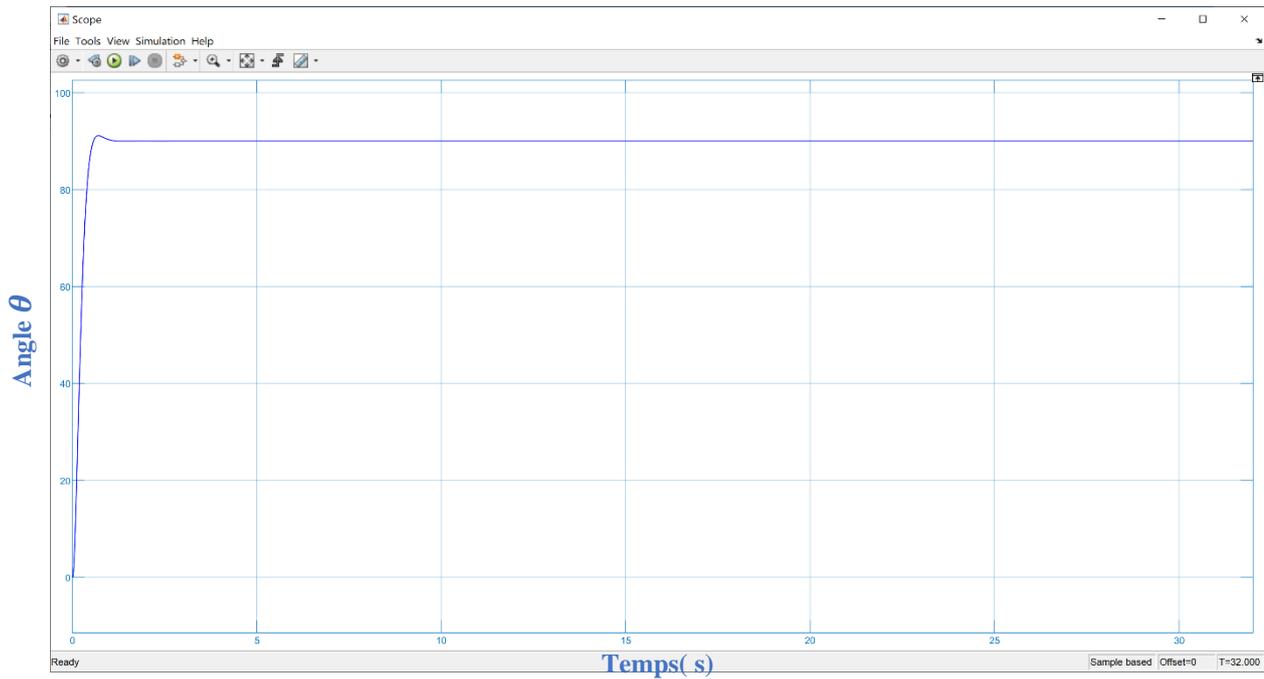


Figure IV-45: Courbe de  $\theta_1$

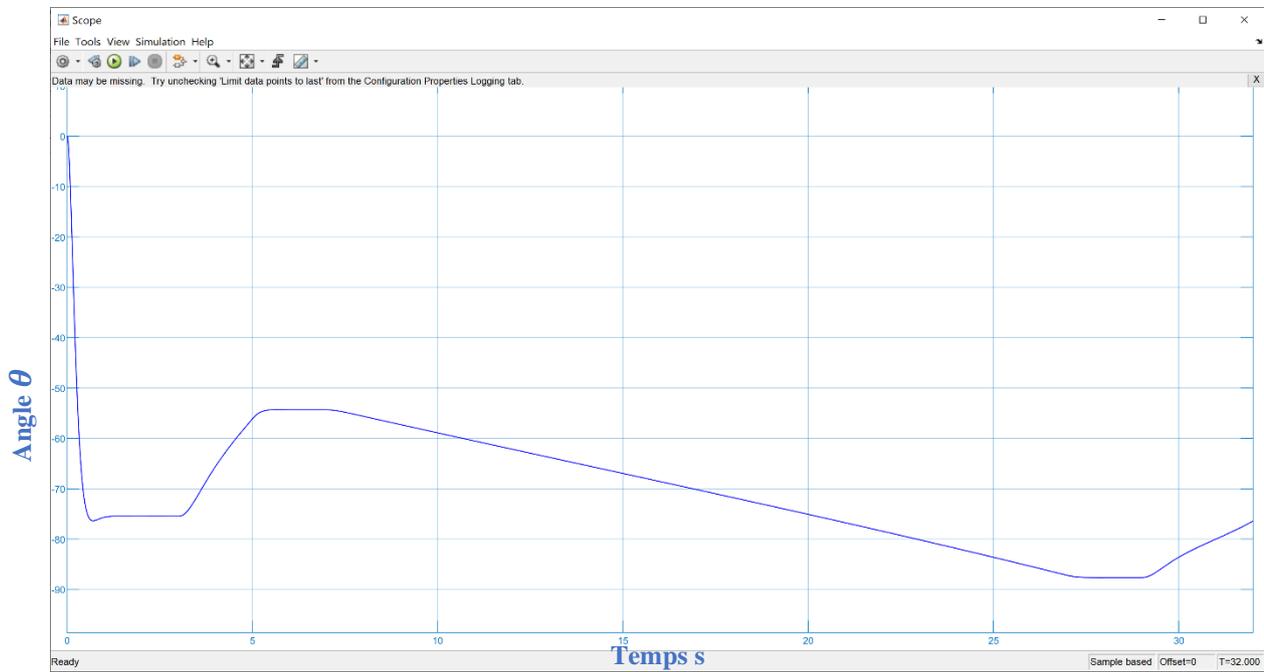
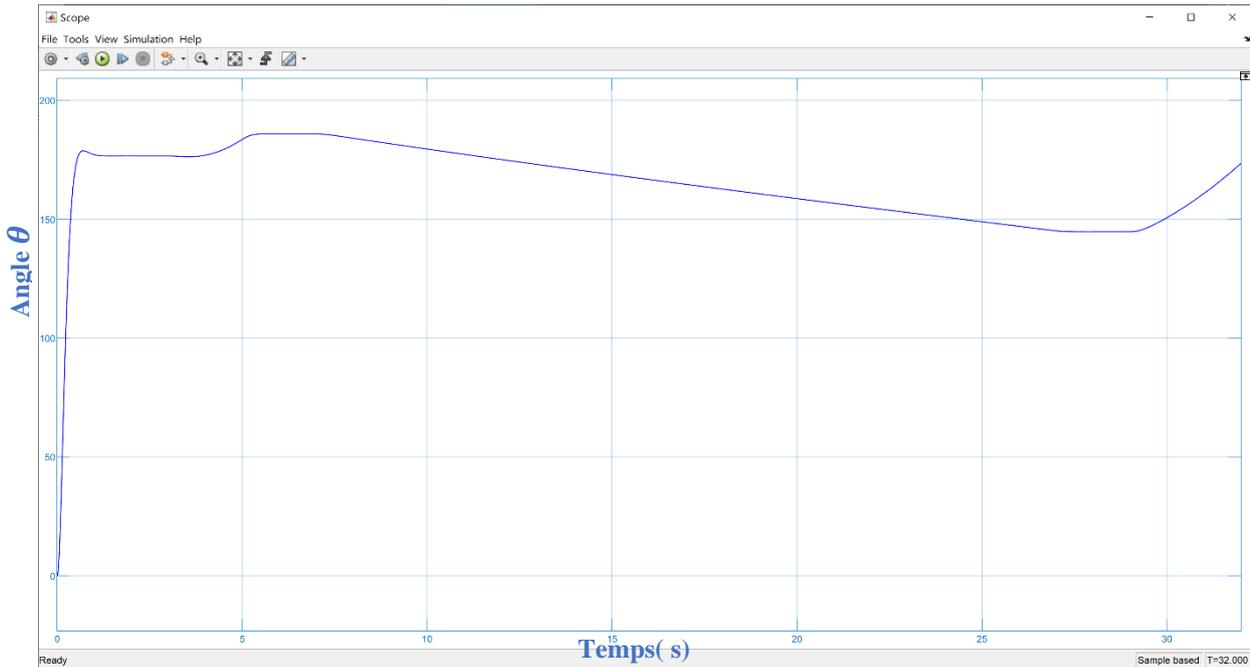


Figure IV-46: Courbe de  $\theta_2$



**Figure IV-47:** Courbe de  $\theta_3$

Après une simulation réussie, le robot s'est déplacé selon la trajectoire désirée, atteignant ainsi notre objectif.

## IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la modélisation géométrique et cinématique ainsi que la conception et la simulation d'un robot à 3 degrés de liberté (DDL). Nous avons utilisé SOLIDWORKS pour modéliser les pièces et KeyShot pour les rendus visuels. La simulation a été réalisée avec MATLAB Simulink et Simscape pour faire suivre au robot une trajectoire de soudage prédéfinie.

Nous avons importé les composants dans Simulink, intégré les actionneurs et les réducteurs cycloïdaux, et défini les articulations du robot. Un correcteur proportionnel-intégral (PI) a été choisi pour stabiliser le système, grâce à sa capacité à éliminer l'erreur statique et à améliorer la stabilité en régime permanent.

Après avoir configuré et connecté les blocs nécessaires, nous avons effectué des simulations pour vérifier la précision et la stabilité du robot.

## Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons traité une problématique assez majeure, dont on a touché à des divers domaines (**Electromécanique, mécatronique**). On s'est donc concentrés sur trois parties :

Premièrement, nous avons passé par la modélisation géométrique et cinématique du robot, impliquant la création de représentations mathématiques ou informatiques pour décrire son comportement, sa structure et ses caractéristiques physiques.

En deuxième lieu, nous sommes passés à la conception du robot à l'aide du logiciel **SOLIDWORKS** pour créer toutes les pièces nécessaires du robot. Ce processus a impliqué la modélisation détaillée de chaque composant, en tenant compte des contraintes de fabrication et des spécifications techniques requises.

La troisième partie est dédiée à la simulation de robots, et on a profité de la large bibliothèque **SIMULINK** de logiciel **MATLAB**, pour commander et asservir notre système en utilisant la correction PID.

Enfin, nous avons proposé un scénario où l'organe terminal a été programmé pour suivre la trajectoire définie par un cahier des charges, afin d'effectuer le soudage du coffre-fort.

Dans une perspective d'avenir, nous souhaitons construire ce robot de soudage pour améliorer la précision et l'efficacité des opérations industrielles. En intégrant des technologies avancées, nous visons à optimiser la productivité et la sécurité sur les chantiers, tout en répondant aux défis de l'industrie moderne.

---

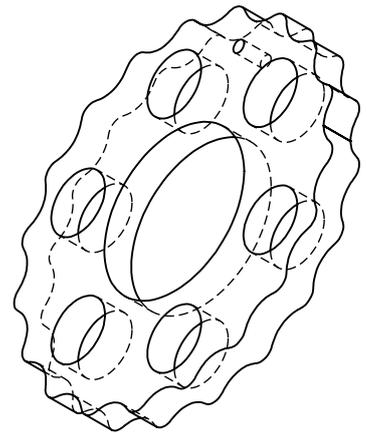
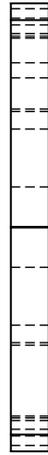
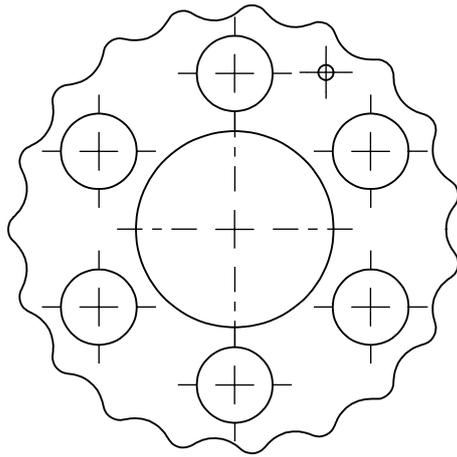
## Bibliographie

- [1] : SOFICLEF (2022) *Enterprise*.
- [2] : Dr. IKKACHE. *Cours Procédés de fabrication*.2022
- [3] :Maki News.Le fonctionnement et les différents types de fraiseuses.2024
- [4] :Fiber Laser Egypte.
- [5] : MACE 700. DÉCOUPE TÉLÉOPÉRÉE. Scopex.2024
- [6] : Maki News.Procédés de découpe : oxycoupage et découpe plasma.2024
- [7]: Direct Industry. Presse hydraulique PCK PACK.2024
- [8] :Esquisse-3d. Moulage en Sable.2024
- [9]:DjelilAbderrahmen.*Etude de la technologie de fabrication d'un embouti debouteille à gaz. Université de Annaba. Mémoire 2020.*
- [10] : *Cintrage*. 26 Jan. 2024, [fr.wikipedia.org/wiki/Cintrage](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cintrage).
- [11] : sous-traitance.francemetal. Le pliage.
- [12] : *Metal-Interface*. "Pliage : Méthodes De Pliage, Types De Pliage." *Metal Interface*,2023
- [13] : *Introduction Générale au Soudage. Université de Biskra. Mémoire 2024*
- [14] : Rostkowska, Justyna. "Histoire Et Genèse Du Soudage." *Article 2023*,
- [15] : Bouteghmes, Djamel. *Techniques de soudages avances.Université de Batna. Mémoire.*
- [16] :Wikihow. Conception d'assemblage soudé. Article 2024
- [17] : "Guide Des 5 Types De Base D'assemblages Soudés." *esab.com. Article 2024*
- [18] : "Différents Types De Soudure | Les Entreprises HARtech." *HARtech, 10 Nov. 2023*,
- [19] :Alex. "Soudage Par Résistance Électrique - Ce Que Vous Devez Savoir À Ce Sujet".2022
- Djeriri, Youcef. "Commande SMA-Licence de Mécatronique.". Article 2020,
- "Généralités Sur La Robotique. Cours Robotique. Université de Tiaret
- [20] : *Cours De Robotique Et Manipulation (Télécom Physique Strasbourg)*.

- 
- [21] :ISTIA, Université Angers, Jean-Louis Boimond. "Robotics- Modeling and control".2017
- [22] :P. Fissette, H.Buyse, J.C.Samin « Introduction A La Robotique ».Article 2004.
- [23] :Histoire De La Robotique. O. Labbani-Igbida, E. Mouaddib.
- [24] :Diaporama Réalisé Par N. commons [Http://Www.Techno6.Net](http://Www.Techno6.Net) – 2010 Troufflard Sous Licence Creative.
- [25]: Robots Guide. the grandfather of industrial robots.
- [26] : Cours De Robotique, Master 2. Université Ahmad Benbella, Oran.
- [27] :Introduction A La Robotique - Eduscol, Eduscol.Education. Fr/Sti/Sites/.../4836-Fanuc Introduction-La-Robotique-Juin-2014.Pdf
- [28] :Domaines D'application des robots, Damien.Eyn.Free.
- [29] :Robotisation, Maquette Et Mise En Page Réalisées Par Les Editions T.I. Techniques de l'Ingénieur.
- [30]: Dejan. CNC machined vs 3D printed cycloidal drive - designing & testing, How To Mechatronics.
- [31]:Omar Younis. Building a Cycloidal Drive with SOLIDWORKS
- Dombre, K. Bases de la modélisation Des Robots.
- UPJV, département EEA M1 3EA, Parcours Rova, EC15.
- Dr. Rahmoune C. Cours commande des entraînements électromécaniques. 2020.



# Annexes



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

rotor drive I

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

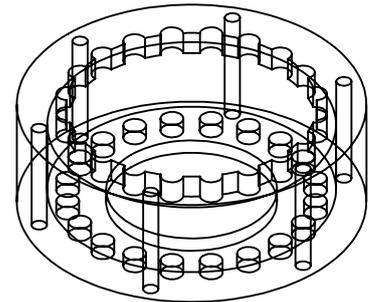
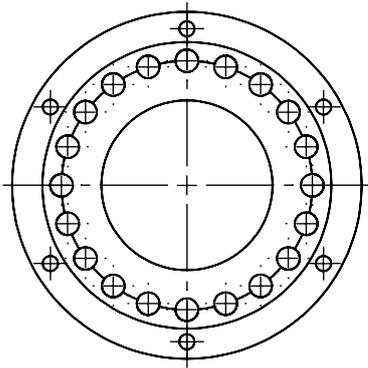
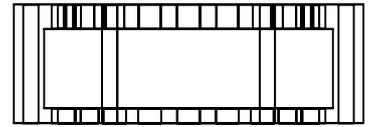
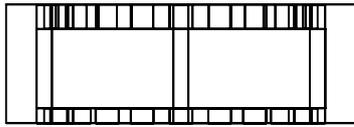
SHEET 1 OF 1

F  
E  
D  
C  
B  
A

F  
E  
D  
C  
B  
A

4 3 2 1

4 3 2 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APP'VD				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

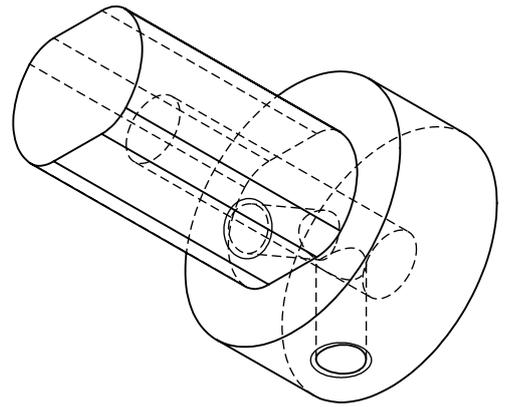
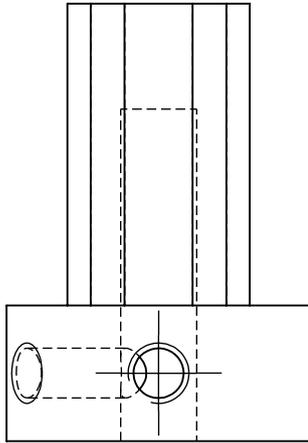
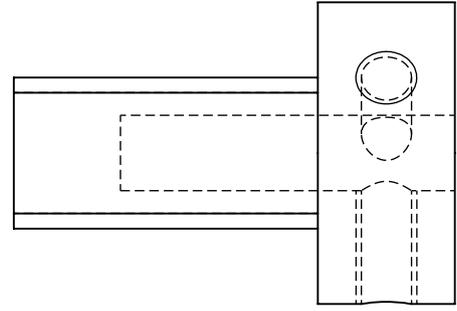
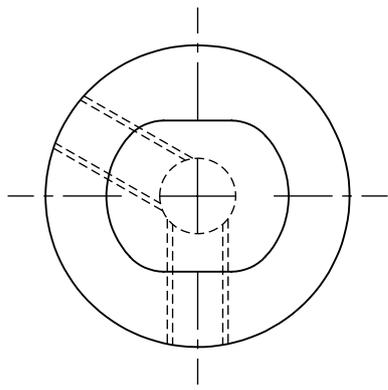
DWG NO.

# Ring roller housing <sup>A4</sup>

WEIGHT:

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

Nema 17 Shaft

A4

WEIGHT:

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1

F  
E  
D  
C  
B  
A

F  
E  
D  
C  
B  
A

4

3

2

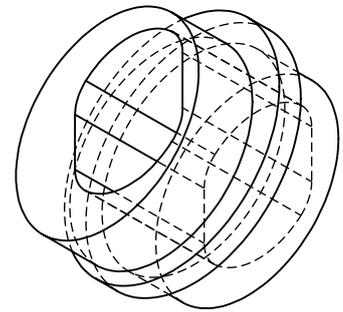
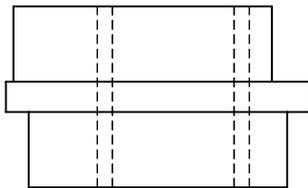
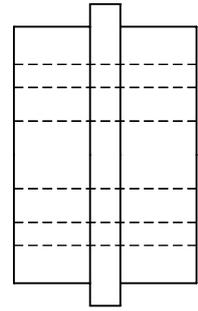
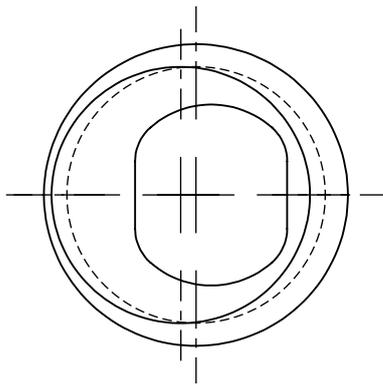
1

4

3

2

1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:

MATERIAL:

WEIGHT:

DWG NO.

**Eccentric shaftt**

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1

A4

F  
E  
D  
C  
B  
A

F  
E  
D  
C  
B  
A

4 3 2 1

4 3 2 1

