

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Thème

Conception, Simulation et Réalisation d'un robot à six degrés de liberté

Abderrahmane CHALAL

Sous la direction de :

- Mr Mohamed TAZI
- Mr Mohamed BOURI

Présenté et soutenu publiquement le (14/10/2021)

Composition du jury:

Mr Djamel BOUKHETALA
Mr Mohamed TAZI
Mr Mohamed BOURI
Mr Djamel SAIDI

Président du jury
Promoteur
Promoteur
Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Thème

Conception, Simulation et Réalisation d'un robot à six degrés de liberté

Abderrahmane CHALAL

Sous la direction de :

- Mr Mohamed TAZI
- Mr Mohamed BOURI

Présenté et soutenu publiquement le (14/10/2021)

Composition du jury:

Mr Djamel BOUKHETALA
Mr Mohamed TAZI
Mr Mohamed BOURI
Mr Djamel SAIDI

Président du jury
Promoteur
Promoteur
Examineur

الملخص :

الغرض من هذه الأطروحة هو تصميم ومحاكاة روبوت مجسم من ستة محاور باستخدام تصميم بمساعدة الكمبيوتر وأدوات محاكاة روبوتية لتحقيق نموذج أولي للروبوت في نهاية المطاف.

الروبوتات المجسمة هي معدات تستخدم على نطاق واسع في الصناعة الحديثة للمهام التي تتطلب دقة عالية أو قابلية تكرار عالية أو التي تمثل صعوبة أو خطرًا على المشغل البشري.

ستحتوي هذه الدراسة على تحجيم العناصر الوظيفية للآلة ، واختيار تقنيات التعشيق وكذلك النماذج الهندسية المباشرة والعكسية.

الكلمات الرئيسية: روبوتات مجسمة ، علبة سرعات دائرية ، نماذج أولية ، تصميم بمساعدة الكمبيوتر ، روبروك.

Abstract :

The purpose of this master report is to design and simulate a six-axis anthropomorphic robot using computer-aided design and robotic simulation tools for the eventual realization of a prototype of the robot.

Anthropomorphic robots are equipment widely used in modern industry for tasks requiring high precision, high repeatability or which present difficulty or danger to the human operator.

This study will contain the dimensioning of the functional elements of the machine, the choice of transmission technologies as well as the direct and inverse Kinematics.

Keywords: anthropomorphic robots, cycloidal drives, CAD, RoboDK, Prototyping.

Résumé :

Ce mémoire a pour but la conception et la simulation d'un robot anthropomorphe à six axes à l'aide des outils de conception assistée par ordinateur et de simulation robotique pour une réalisation éventuelle d'un prototype du robot.

Les robots anthropomorphes sont des équipements vastement utilisés dans l'industrie moderne pour les tâches demandant une grande précision, une répétabilité élevée ou bien qui présente une difficulté ou danger pour l'opérateur humain.

Cette étude contiendra le dimensionnement des éléments fonctionnel de la machine, le choix des technologies de transmission ainsi que les modèles géométriques direct et inverse.

Mots clés : robots anthropomorphes, réducteurs cycloïdales, CAO, RoboDK, Prototypage.

DEDICACES

A la source de ma force, le secret de mon bonheur et ce qui donne goût et sens à ma vie, ma famille, mes grands parents, mes oncles et tantes ; ma chère sœur KHADIJA, mon petit frère ADEM et mon complice AHMED, mon idole mon PERE et avant et après tous à ma perle rare, ma bien aimée et ma reine ma MAMAN, je vous dédie ce modeste travail car si je ne peux pas le partager avec vous, aucun succès ni gloire ne vaudrait rien.

Je dédie ce travail à mon défunt grand père MESSAOUD, j'aurais bien voulu que tu sois parmi nous pour ce moment.

A mes amis des classes préparatoires, mes compagnons du groupe 5 de manière générale et particulièrement Abdelrahmane BOUTERANE je vous dédie ce travail en l'honneur des jours que j'ai partagé avec vous et qui resteront à toujours gravés dans mon cœur.

A mes chers Seif-Eddine, Abdallah, Nabil, Ikkal, Aymen, Yasser, Fares, Mehdi, Louai, Abdelhak, Nadir, Rabie, Asma, Malak, Hadjer, Maria, Malika, Nabila et Manel je vous dédie ce travail pour honorer les liens d'amitié, de fraternité et d'amour que je partage avec vous et pour célébrer les moments de bonheur qu'on a passé ensemble, je vous souhaite une vie pleine de succès et de bonheurs.

CHALAL Abderrahmane

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant de m'avoir soutenu et guidé dans les moments les plus difficiles et m'a donné la volonté et le courage de poursuivre et de me donner a fond pour arriver aujourd'hui là où je suis.

J'adresse mon plus grand remerciement et respect pour mes promoteurs Mr Mohamed Tazi et Mr Mohamed Bouri pour leurs directives, bienveillance et la flexibilité de travail qu'il mon offert tout le long du déroulement de ce projet.

Je remercie tous les membres du groupe CMPE qui ont œuvré pour la réalisation de ce projet et qui ce sont montré un soutien immense à ce dernier.

Je tiens aussi à remercier Mr CHALAL Ahmed, Mr CHALAL Mohamed, Mr BOUZIDI Abdelaziz, Mr Mohamed BOUCHAKOUR, Mr Hamid SEDJAL et Mme CHAREB Oumelkheir sans lesquels le projet ne serait pas là ou il en est.

Je voudrais aussi remercier ma famille généralement et mes parents plus précisément pour leurs soutien, leur aide et leur foi durant toutes ces années et tout le long de mon cursus car c'est grâce à eux que je suis arrivé ici.

TABLES DES MATIERES

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION..... | 9 |
| I- ETAT DE L'ART..... | 10 |
| 1- HISTORIQUE DE LA ROBOTIQUE..... | 11 |
| 2- DEFINITION D'UN ROBOT..... | 12 |
| 3- LES ROBOTS INDUSTRIELS..... | 12 |
| 3.1- LES ROBOTS CYLINDRIQUES | 13 |
| 3.2- LES ROBOTS POLAIRES | 13 |
| 3.3- LES ROBOTS CARTESIENS..... | 14 |
| 3.4- LES ROBOTS SCARA..... | 14 |
| 3.5- LES ROBOTS PARALLELES..... | 15 |
| 3.6- LES ROBOTS ANTHROPOMORPHES..... | 15 |
| 4- REDUCTEUR CYCLOÏDAL..... | 16 |
| 5- MOTEURS PAS A PAS..... | 17 |
| II- ETUDE THEORIQUE ET CONCEPTION PRELIMINAIRE DU ROBOT..... | 19 |
| 1- MODELE GEOMETRIQUE DIRECT..... | 20 |
| 2- MODELE GEOMETRIQUE INVERSE..... | 21 |
| 3- MODELE CINEMATIQUE DIRECTE..... | 22 |
| 4- MODELE CINEMATIQUE INVERSE..... | 23 |
| 5- MODEL DYNAMIQUE..... | 23 |
| 6- CHOIX DU ROBOT..... | 25 |
| 7- LES PARAMETRES DH..... | 26 |
| 8- CONCEPTION DU ROBOT..... | 28 |
| 8.1- CONCEPTION DES REDUCTEURS..... | 29 |
| 8.2- L'ASSEMBLAGE PRELIMINAIRE..... | 32 |
| 9- MODELE GEOMETRIQUE DIRECTE ET INVERSE..... | 33 |
| 9.1- MODELISATION DU ROBOT SUR « Simscape Multibody Link »..... | 33 |
| 9.2- MODELISATION DU ROBOT A L'AIDE D'UN GUI..... | 35 |
| III- DIMENSIONNEMENT FINALE, COMMANDE ET PROTOTYPAGE DU ROBOT | 38 |
| 1- CONCEPTION FINAL..... | 39 |
| 2- PLANIFICATION DE LA TRAJECTOIRE..... | 41 |
| 3- COMMANDE DU ROBOT..... | 46 |
| 3.1- STM32..... | 46 |
| 3.2- A4988..... | 46 |
| 3.3- DM556..... | 47 |
| 4- PROTOTYPAGE DU ROBOT..... | 48 |
| 4.1- IMPRESSION 3D..... | 48 |
| 4.2- LE TOURNAGE..... | 49 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 4.3- L'AJUSTAGE..... | 50 |
| 4.4- LE CIRCUIT ELECTRONIQUE..... | 51 |
| 4.5- L'ASSEMBLAGE..... | 52 |
| 5. TESTS..... | 53 |
| IV- CONCLUSION..... | 54 |
| V- BIBLIOGRAPHIE..... | 55 |
| VI- ANNEXES | 57 |
| 1- PLANS DES PIECES | 57 |

Tables des figures

| | |
|--|----|
| I.1 Premier robot industriel d'UNIMATION 1954..... | 11 |
| I.2 ROBOTS de Boston Dynamics..... | 12 |
| I.3 Robot cylindrique Seiko..... | 13 |
| I.4 Robot polaire Fanuc..... | 13 |
| I.5 Robot cartésien (machine CNC)..... | 14 |
| I.6 Robot SCARA..... | 14 |
| I.7 Robot parallèles..... | 15 |
| I.8 Station de soudage a robot anthropomorphes..... | 15 |
| I.9 Vue de coupe d'un réducteur cycloïdale..... | 16 |
| I.10 Composants d'un réducteur cycloïdal..... | 17 |
| I.11 Moteur pas a pas..... | 18 |
| II.1 Confissions de Denavit Hartenberg..... | 20 |
| II.2 Disposition des repères d'un robot anthropomorphes à six axes..... | 21 |
| II.3 soudure à laide d'un robot anthropomorphe à six axes..... | 25 |
| II.4 Robot anthropomorphes collaboratif à six axes..... | 25 |
| II.5 Peinture à laide de robots anthropomorphes à six axes..... | 25 |
| II.6 dépôt de la résine a l'aide d'un robot anthropomorphe à six axes..... | 25 |
| II.7 Dispositions des axes d'un robot industriel..... | 26 |
| II.8 Disposition des axes d'un robot collaboratif..... | 26 |
| II.9 Cycloïde proprement définis..... | 29 |
| II.10 Vérification de la conformité de la cycloïde..... | 30 |
| II.11 Composant du réducteur cycloïdal..... | 30 |
| II.12 Ajout des relations de came..... | 30 |
| II.13 Ajout des relations tangentielles..... | 31 |
| II.14 Réducteur assemblé..... | 31 |
| II.15 Porte moteur numéro deux..... | 32 |
| II.16 Model préliminaire du robot..... | 32 |
| II.17 Import du robot sur « Simscape Multibody Link »..... | 33 |
| II.18 Modélisation du robot sur « Simscape Multibody Link »..... | 33 |
| II.19 Model du réducteur sur « Simscape Multibody Link »..... | 34 |
| II.20 Simulation du robot sur « Simscape Multibody Link »..... | 34 |
| II.21 Effet de la commande des relations du robot sur « Simscape Multibody Link »..... | 35 |
| II.22 Création du GUI sur MATLAB..... | 36 |

| | |
|---|----|
| II.23 Simulation du robot à l'aide du GUI..... | 36 |
| III.1 Calcul des propriétés de masses des pseudos assemblages..... | 40 |
| III.2 Conception final du robot..... | 41 |
| III.3 Import du robot sur RoboDK..... | 42 |
| III.4 Création du robot sur RoboDK..... | 42 |
| III.5 Robot définit sur RoboDK..... | 43 |
| III.6 Ajout et la définition du TCP de l'effecteur final..... | 43 |
| III.7 Définition des limites angulaires du robot..... | 43 |
| III.8 Robot avec effecteur final sur RoboDK..... | 44 |
| III.9 Définition d'un projet de suivi de courbe..... | 44 |
| III.10 Définition des événements et l'approche du projet..... | 45 |
| III.11 Sélection de la courbe et l'angle d'approche de l'outil final..... | 45 |
| III.12 Carte STM32..... | 46 |
| III.13 A4988 motor driver..... | 46 |
| III.14 DM556 motor driver..... | 47 |
| III.15 GUI de communication avec le robot..... | 47 |
| III.16 Impression 3D..... | 48 |
| III.17 Pièces réalisées par impression 3D..... | 48 |
| III.18 Pièces réalisées par tournage..... | 49 |
| III.19 Taraudage des pines..... | 49 |
| III.20 Limage de la cycloïde..... | 50 |
| III.21 Ajustage de la cycloïde..... | 50 |
| III.22 Circuit électronique du robot..... | 51 |
| III.23 Schéma de la carte électronique..... | 51 |
| III.24 Prototype du robot..... | 52 |

INTRODUCTION

La robotique a vu le jour aux alentours des années cinquante du siècle dernier et s'est introduite graduellement et de plus en plus dans l'industrie moderne. En effet suite à la deuxième guerre mondiale, la population mondiale a commencé à croître exponentiellement ce qui a créé une masse consommatrice mondiale à laquelle l'industrie traditionnelle ne pouvait subvenir la poussant à adopter un rythme bien plus rapide.

En même temps les premiers calculateurs et ordinateurs venaient d'être produits de plus les équipements d'automatisme, l'électronique de contrôle, les moteurs électriques et les vérins hydrauliques devenaient de plus en plus performant et moins cher.

Cette atmosphère a donné l'étincelle qui donnera naissance aux premiers robots, des machines de pointe qui accéléreront la cadence de production, augmenteront la précision, réduiront les coûts de production ou créeront de nouvelles possibilités considérées dangereuses ou impossibles pour l'humain.

Le marché mondial de la robotique industrielle a généré un montant de 39.64 milliards de dollars en 2019 et les spécialistes prédisent qu'il toucherait les 101.72 milliards de dollars en l'an 2027 avec une croissance annuelle de 12.5%[5].

L'Algérie est un marché vierge pour la robotique bien que quelques applications ont été adoptées comme par exemple le robot à quatre axes de Rouiba, le marché algérien offre un nombre incalculable d'opportunités pour l'adoption de solutions robotiques qui optimiseront l'industrie nationale et sa productivité.

Afin d'avoir une introduction au domaine, de bien maîtriser les nouvelles technologies et de pouvoir proposer l'intégration de la robotique dans l'industrie algérienne nous allons nous intéresser aux robots anthropomorphes à six axes. Ce type de robots est largement utilisé dans l'industrie moderne et il donne un spectre large d'applications.

Ce présent mémoire va inclure la conception d'un robot anthropomorphe à six axes, la simulation ainsi que la réalisation d'un prototype de ce dernier.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART

Pour ce chapitre nous allons définir la robotique généralement, les types de robots industriels modernes ainsi que quelques technologies de réduction et motorisation utilisées dans le domaine.

1- HISTORIQUE DE LA ROBOTIQUE :

Le domaine de l'industrie a connue une expansion phénoménale au cours du siècle dernier due à la croissance économique mondiale, cette expansion a engendré la création de plusieurs tâches industrielles basées sur le phénomène de la répétition. La rapidité et la précision présentent souvent un risque pour la santé ou la vie des travailleurs, ceci a poussé les ingénieurs à développer des solutions qui avec le temps deviendrons ce qu'on connaît de nos jours comme la robotique industrielle moderne.

L'histoire des robots industriels commence en 1954, lorsque George Devol dépose un brevet pour le premier robot programmable par apprentissage. En 1956, il cofonde Unimation avec Joseph Engelberger. Le premier robot de l'entreprise avec un actionneur hydraulique a été vendu à General Motors en 196. En 1964, le géant de l'automobile passe 66 commandes pour le même robot, ce qui donne véritablement le coup d'envoi aux activités d'Unimation.



FIGURE I.1 Premier robot industriel d'UNIMATION 1954

En avril 1972, la direction d'ASEA décide de lancer un projet complet de développement de robots et nomme Björn Weichbrodt comme responsable. Le premier prototype fut soumis à la direction en février 1973. Dès le début, le projet était complet, de la conception mécanique et électronique au marketing, en passant par le développement d'applications. La conception mécanique a été confiée à deux grands noms du domaine, Ove Kullborg et Bengt Nilsson, chacun responsable d'une dizaine d'ingénieurs.

Le choix de base du type de commande apparaît immédiatement: pneumatique, hydraulique ou électrique? Le pneumatique fut éliminé n'ayant pas fournit la rigidité de transmission ainsi que la précision et la répétabilité requises. Pour trancher entre l'hydraulique et l'électrique, un concours interne a été organisé entre les deux équipes menées par Ove Kullborg et Björn Weichbrodt pour concevoir et construire le prototype des trois arbres inférieurs de l'entraînement électro-hydraulique. Dans la confrontation entre les deux solutions, le système

électrique de Kullborg a gagné ce qui propulsera la solution électrique vers de nouveaux horizons de développement au cours des années qui suivent.

Les années 90 ont connues une intégration plus importante de la robotique dans les diverses applications industrielles, ceci est dû à la résolution d'un nombre de problèmes techniques, au fait que la motorisation électrique ne présente plus de dangers et les microprocesseurs sont plus performants et maîtrisés par les constructeurs et les clients. Cet écosystème donne à la robotique des années 90 la lancée qui la transformera au cours des prochaines années vers la robotique industrielle moderne d'aujourd'hui.

Après ce bref aperçu historique, nous voudrions comprendre, en premier lieu qu'est-ce qu'un robot?

2- DEFINITION D'UN ROBOT :

Un robot est un dispositif mécatronique qui peut accomplir automatiquement une série de tâches préprogrammées ou interactives. Ces tâches peuvent être répétitives, précises, dangereuses ou simplement impossible pour l'humain.

Les robots peuvent être fixes ou mobiles, terrestres, aériens, ou marins, leurs applications peuvent être civiles ou militaires.

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser aux robots industriels fixes[10].



FIGURE I.2 ROBOTS de Boston Dynamics

3- LES ROBOTS INDUSTRIELS :

Un robot industriel est essentiellement un système mécanique articulé qui peut positionner et orienter un outil porté par son extrémité, de manière quelconque et désirée pour réaliser des tâches bien définies, dans un certain volume qu'on nomme espace atteignable du robot. Cet espace est l'espace balayé par les articulations. Les articulations sont prismatiques générant un mouvement de translation ou bien rotoides générant un mouvement de rotation[1].

Le type des articulations d'un robot et leurs dispositions est ce qui permet de classer les robots industriels. On distingue plusieurs types de robots industriels et on peut les classer selon les catégories suivantes :

- **LES ROBOTS CYLINDRIQUES** : Un robot cylindrique est constitué de trois articulations en série une première rotoïde permettant la rotation, les deux suivantes sont prismatiques permettant deux translations (la première suivant l'axe de rotation et la deuxième perpendiculaire à ce dernier) donnant à ce robot un espace de travail cylindrique. Ce type de robots est utilisé souvent pour le moulage par injection, soudage par points ou encore des opérations d'assemblage.



FIGURE I.3 Robot cylindrique Seiko

- **LES ROBOTS POLAIRES** : Ces derniers sont semblables aux robots précédemment cités sauf que la seconde articulation est rotoïde et non pas prismatique ce qui donne un espace de travail plus sphérique. D'autres axes peuvent être ajoutés à l'extrémité de l'articulation prismatique selon les applications.



FIGURE I.4 Robot polaire Fanuc

- **LES ROBOTS CARTESIENS** : Ces robots sont connus sous le nom de machine CNC qui se constitue de trois articulations prismatiques et permet à l'effecteur final de réaliser des mouvements plan. Ce type de robots est réputé pour sa précision et la facilité d'utilisation ce qui justifie sa large utilisation pour la mécanique de précision tel que le fraisage et le tournage ainsi que les découpes plasma, laser, jet d'eau, ... etc. Des articulations additionnelles peuvent être ajoutées à ce type de machine pour des applications bien spécifiques.



FIGURE I.5 Robot cartésien (machine CNC)

- **LES ROBOTS SCARA** : Les robots SCARA sont similaires aux robots cartésiens du point de vue fonctionnalité et mouvement de l'effecteur final sauf que le mouvement plan est assuré par deux articulations rotatives et non pas prismatiques. Il est caractérisé aussi par la rapidité de ses mouvements dus à la grande accélération des moteurs ce qui lui donne une grande popularité pour les tâches d'assemblage, d'emballage et de tri sélectif.



FIGURE I.6 Robot SCARA

- **LES ROBOTS PARALLELES** : Les robots parallèles ont la particularité comme leurs nom l'indique d'avoir plusieurs liens mécanique entre la base du robot et son outil terminal, les articulations sont symétriques par rapport à l'axe de la base et identique. Ce type de robot est réputé pour sa rapidité et sa précision ce qui le rend parfait pour les applications d'emballage et de tris tant que les charges utiles des tâches sont relativement petites.



FIGURE I.7 Robot parallèles

- **LES ROBOTS ANTHROPOMORPHES** : ce type de robots est constitué généralement de 4 à 6 articulations rotoides en série permettant au robot d'effectuer des mouvements humanoïdes et complexes, ce type de robots est largement utiliser dans l'industrie automobile pour les tâches de soudage, de peinture, de déposition de matière ainsi qu'autres tâches qui demandent des orientations relativement complexes de l'effecteur final.



FIGURE I.8 Station de soudage a robot anthropomorphes

4- REDUCTEUR CYCLOÏDAL :

Les réducteurs cycloïdaux sont un type de réducteurs compacts avec des taux de réductions élevés pour des encombrements mécaniques relativement faibles, ils se composent principalement d'un arbre excentrique introduit dans un roulement à travers lequel une came qu'on appelle cycloïde ayant une géométrie assez particulière est actionnée. Le principe est que la came qui a un nombre de creux définis épouse des pines situées sur une couronne. Le nombre des pins est supérieur au nombre des creux ce qui fait que le mouvement de la came le long de la périphérie de la couronne induise une rotation contraire à la rotation de l'arbre excentrique de la came par rapport à son axe.

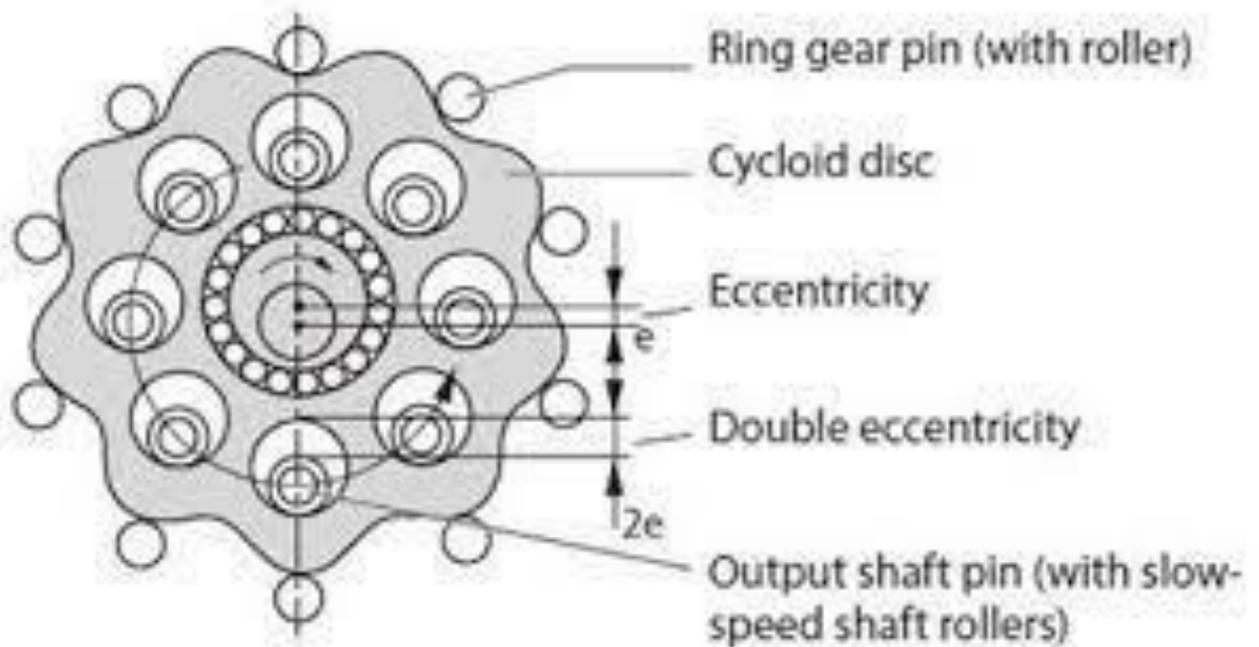


FIGURE I.9 Vue de coupe d'un réducteur cycloïdale

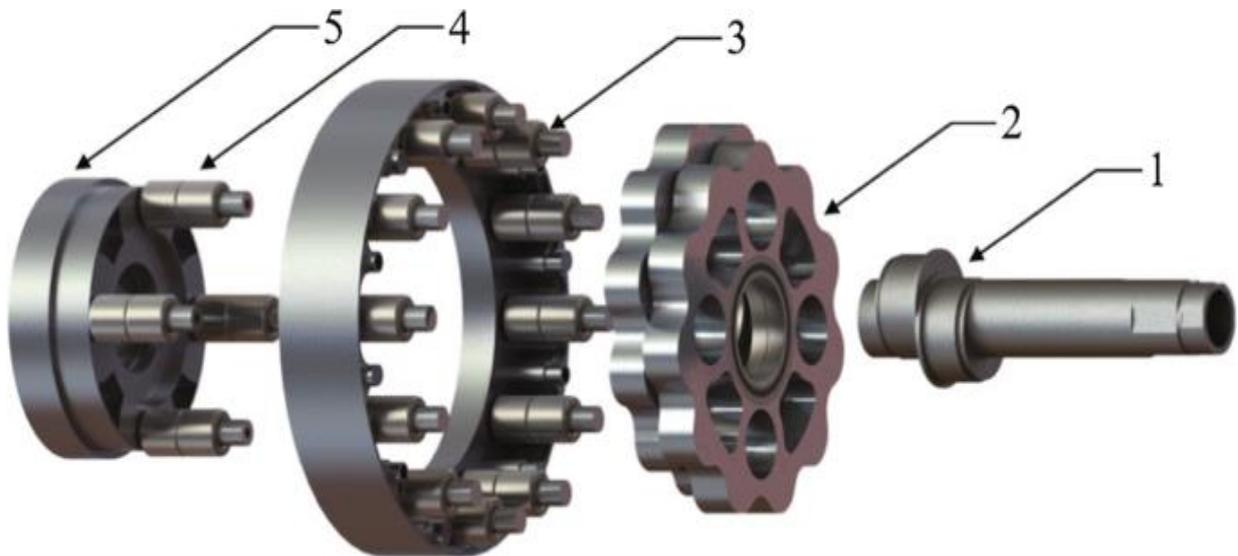
La cycloïde contient des trous dans lesquels s'insèrent les pines de l'arbre de sortie. Ces trous ont un diamètre supérieur aux pines de l'arbre de sortie et transmettent le mouvement de rotation par entraînement des pines qui sont tangents aux trous de la cycloïde.

D'après l'explication et la description précédente on peut conclure que le rotor ou cycloïde tourne par rapport à son axe une fois qu'il ait effectué un nombre de rotations excentriques égales au nombre de creux de la cycloïde, ce qui donne une réduction :

$$\tau = \frac{1}{N}$$

Ce type de réducteur présente un inconvénient intuitif qui est la création et la propagation des vibrations dues aux mouvements excentriques de la cycloïde. Pour remédier à ce problème des contre masses ou biens d'autres cycloïdes déphasés les uns par rapport aux autres pour générer un balourd opposé à celui de la cycloïde et annuler les vibrations.

Ce type de réducteur est largement utilisé dans les applications où le couple est relativement important et où l'encombrement doit être réduit à un minimum.



- 1- Arbre excentrique
- 2- Cycloïdes
- 3- Pins de la couronne
- 4- Pines de l'arbre de sortie
- 5- Arbre de sortie

FIGURE I.10 Composants d'un réducteur cycloïdal

5- LES MOTEURS PAS A PAS :

Les moteurs pas à pas sont un type de moteurs électriques qui fonctionnent sous un signal électrique impulsionnel. Chaque impulsion fait tourner le moteur d'un angle précis et constant qu'on appelle *pas* et qui dépend du type du moteur et de sa constitution. On distingue trois types de moteurs pas à pas :

- **Moteur à aimants permanents** : Le stator de ce type comprend un nombre de bobines dont la polarité est régit par le courant d'alimentation. Le rotor contient sur sa périphérie les pôles nord et sud de l'aimant permanent et l'alimentation des bobines engendre la rotation du rotor par effet électromagnétique.

- **Moteur à réluctance variable** : Le stator contient un nombre de dentures sur lesquelles le bobinage est disposé. Ce bobinage fait tourner le rotor qui est composé d'un ferromagnétique et qui a un nombre de denture différent de celui du stator. Lors de l'alimentation du rotor ce positionne de façon que la réluctance du circuit est minimale.

- **Moteur hybride** : Comme son nom l'indique le moteur hybride est une combinaison des deux types précédemment cités ce qui lui permet de développer des couples plus importants avec des précisions de pas encore plus fines.

Les moteurs pas à pas sont connus pour leur précision, la facilité de l'utilisation car ils ne nécessitent pas une boucle d'asservissement et le rapport couple/taille qu'ils fournissent est relativement important[4].

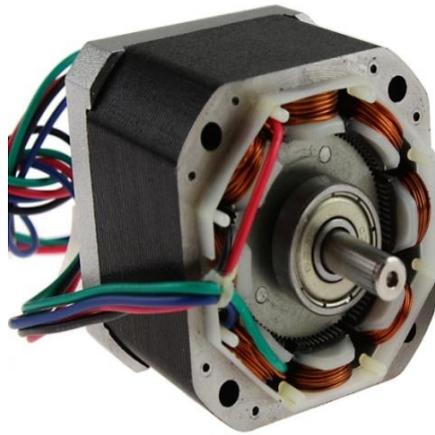


FIGURE I.11 Moteur pas a pas

Conclusion :

Dans le chapitre précédent nous avons définis les robots industriels, leurs types ainsi que le type de motorisation et réduction que nous allons utiliser prochainement durant ce projet.

CHAPITRE II
ETUDE THEORIQUE ET
CONCEPTION PRELIMINAIRE
DU ROBOT

Dans ce qui suit nous allons introduire les modèles mathématiques de la robotique moderne, nous justifierons le choix de notre type de robot et nous réaliserons une conception préliminaire du robot.

1- MODELE GEOMETRIQUE DIRECT :

Le modèle géométrique direct est ce qui permet de déterminer la position et l'orientation de l'effecteur final à travers des transformations rigides des repères respectifs aux articulations du robot. La détermination de ce dernier peut s'avérer complexe selon la géométrie du robot, plusieurs méthodes ont été développées pour résoudre ce problème. Le modèle mathématique de Denavit-Hartenberg est le plus utilisé pour sa simplicité et généralité car il décompose le passage de chaque repère au suivant en une deux rotations et deux translations.

Le passage peut être exprimé avec la matrice de passage suivante :

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Où θ_i , α_i , d_i et a_i sont les coefficients de Denavit-Hartenberg qui représentent l'angle entre x_i et x_{i-1} autour de Z_{i-1} , l'angle entre Z_i et Z_{i-1} suivant x_i , la dénivelé entre deux repères successif suivant Z_{i-1} et la distance entre deux repères successifs suivant x_i respectivement .

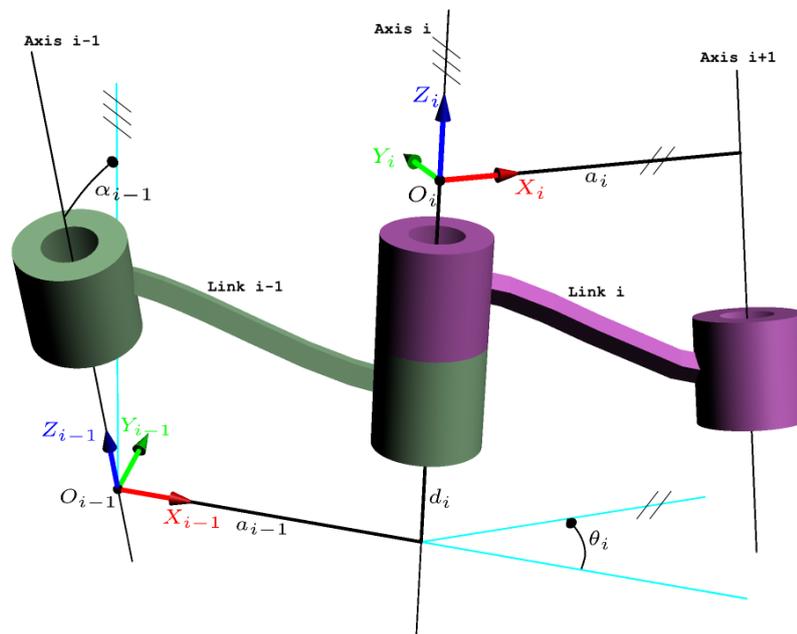
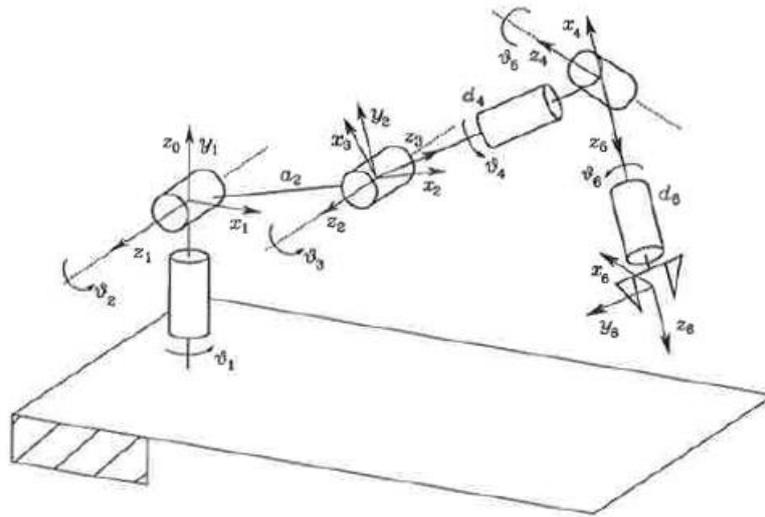


FIGURE II.1 Confections de Denavit Hartenberg

Pour déterminer la position et l'orientation de l'effecteur final il suffit de multiplier les matrices de passage entre chaque deux articulations pour obtenir la matrice de passage globale n_0T tel que :

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos(\delta)\cos(\varphi) & -\cos(\delta)\sin(\varphi) & \sin(\delta) & X \\ \cos(\gamma)\sin(\varphi) + \cos(\varphi)\sin(\gamma)\sin(\delta) & \cos(\gamma)\cos(\varphi) - \sin(\varphi)\sin(\gamma)\sin(\delta) & -\cos(\gamma)\sin(\delta) & Y \\ \sin(\varphi)\sin(\gamma) - \cos(\gamma)\cos(\varphi)\sin(\delta) & \cos(\varphi)\sin(\gamma) + \cos(\gamma)\sin(\delta)\sin(\varphi) & \cos(\gamma)\cos(\delta) & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Où X, Y et Z sont les positions de l'effecteur final par rapport au repère de la base et γ , δ et φ sont les angles de lacet, tangage et roulis respectivement de l'effecteur final.



Anthropomorphic arm with spherical wrist

FIGURE II.2 Disposition des repères d'un robot anthropomorphes à six axes

2- MODELE GEOMETRIQUE INVERSE :

Pour des applications réelles, la position et l'orientation de l'effecteur sont connues et imposées selon les tâches à accomplir. Cependant les valeurs angulaires des articulations restent inconnues et leur détermination engendre un grand nombre de manipulations mathématiques. Dans ce cadre on a adopté une méthode de résolution numérique, dite méthode itérative.

Bien que cette méthode fournit une solution approchée, elle permet de résoudre avec précision le MGI d'un nombre de robots très complexes et qui sont jusqu'à aujourd'hui non résolue autrement, cette méthode implique le calcul de la Jacobéenne qui est une matrice définit comme suit :

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \end{bmatrix}$$

La Jacobéenne peut aussi être calculée géométriquement tel que :

$$J(q) = \begin{bmatrix} j_{p1} & \cdots & j_{pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ j_{o1} & \cdots & j_{o1} \end{bmatrix}$$

Avec

$$J_{pi} = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{pour les articulations prismatiques}$$

Et

$$J_{pi} = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times (P - P_{i-1}) \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad \text{pour les articulations rotoides}$$

Où P_i est la position du repère de l'articulation $i^{\text{ème}}$, P est la position de l'effecteur final et Z_i est l'axe de l'articulation $i^{\text{ème}}$.

Après ce calcul on donne une valeur initiale aux articulations et on calcule la position et l'orientation de l'effecteur final et on la compare avec la pose désiré, la différence et notée δT avec laquelle on calcule δq tel que :

$$\delta q = J^{-1} * \delta T$$

On ajoute le δq au q initial et on refait les mêmes étapes.

Cette méthode converge souvent vers les valeurs les plus proches des valeurs initiales choisies.

L'inconvénient de cette méthode est que le mauvais choix des valeurs initiales peut conduire à la divergence de la méthode.

De nos jours on peut facilement trouver un nombre de simulateurs avec des interfaces interactives qui permettent le calcul du MGI de n'importe quel robot, le seul inconvénient c'est qu'ils sont souvent payants[9].

3- MODELE CINEMATIQUE DIRECTE :

Le modèle cinématique est la continuation de l'étude du MGD car elle s'intéresse au calcul du torseur cinématique \dot{X} de l'effecteur et ceci en fonction des vitesses articulaires \dot{q} , la vitesse de l'effecteur final est divisée en deux vitesses :

- Une vitesse linéaire de l'effecteur par rapport au repère fixe de la base v_{0n}

$$v_{0n} = v_{01} + v_{12} + v_{23} + v_{34} + \dots + v_{n-1n}$$

Où $v_{i-1 i}$ représente la vitesse de translation de l'articulation i par rapport à l'articulation $i-1$

$$v_{i-1 i} = Z_{i-1} * \dot{q}_i \quad \text{pour les axes prismatiques}$$

$$v_{i-1 i} = \Omega_{i-1 i} \times (O_{i-1}O_n)$$

$$v_{i-1 i} = Z_{i-1} \times (P - P_{i-1}) * \dot{q}_i \quad \text{pour les axes rotoides}$$

- Une vitesse de rotation de l'effecteur par rapport au repère fixe de la base Ω_{0n}

$$\Omega_{0n} = \Omega_{01} + \Omega_{12} + \Omega_{23} + \dots + \Omega_{n-1 n}$$

Où $\Omega_{i-1 i}$ représente la vitesse de rotation de l'articulation i par rapport à l'articulation $i-1$

$\Omega_{i-1 i} = 0$ pour les axes prismatiques

$\Omega_{i-1 i} = Z_{i-1} * \dot{q}_i$ pour les axes rotoïdes

Par identification, on remarque que le modèle cinématique utilise la matrice Jacobéenne tel que :

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

La méthode de la Jacobéenne nous permet de calculer les vitesses de l'effecteur sans avoir à faire recours à la dérivation de la position de l'effecteur car cela est parfois compliqué surtout pour des robots avec un nombre élevé de degré de liberté.

Lors du calcul du MCD il faut noter que dans certaines configurations l'effecteur perd un ou plusieurs degrés de liberté du fait que certaines équations cinématiques deviennent linéairement dépendantes. Cette perte est problématique car la résolution du système cinématique donne des valeurs infinies aux vitesses articulaires afin que l'effecteur se déplace. Ce type de configurations est appelé configurations singulières et ils se produisent généralement pour deux raisons :

- Deux axes d'articulations prismatiques deviennent parallèles.
- Deux axes d'articulations rotoïdes deviennent identiques.

4- MODELE CINEMATIQUE INVERSE :

Pareil au modèle géométrique inverse, le modèle cinématique inverse consiste en le calcul des vitesses des articulations du robot tout en sachant le torseur cinématique de l'effecteur final car pour les applications réelles la vitesse de l'effecteur est fixée selon la tâche à accomplir. Pour calculer les vitesses articulaires on se doit de calculer l'inverse de la matrice Jacobéenne et on applique simplement la loi :

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

Pour certaines configurations le calcul de l'inverse de la matrice Jacobéenne n'est pas possible car la matrice n'est parfois pas carrée donc on doit calculer la pseudo-inverse notée $J^\#$ tel que[7]:

$$J^\# = J^t(JJ^t)^{-1}$$

5- MODELE DYNAMIQUE :

Le modèle dynamique est la formalisation qui met en relation les forces ou couples des articulations aux mouvements et charges manipulés de l'effecteur final et leurs vitesses. On distingue deux formalismes principaux :

- **Le formalisme de Lagrange** : bien que ce dernier comporte un nombre relativement élevé de manipulations mathématiques, il reste le plus général et applicable à tout type de robots. Cette méthode induit le calcul de l'énergie cinétique du robot T ainsi que son énergie potentielle U comme suit :

Pour l'énergie cinétique on calcule la matrice B tel que :

$$B(q) = \sum_{i=1}^n (m_i J_p^{(i)T} J_p^{(i)} + J_o^{(i)T} R_i I R_i J_p^{(i)})$$

On peut maintenant calculer l'énergie cinétique par l'équation :

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^t B(q) \dot{q}$$

Pour l'énergie potentielle on a simplement l'équation suivante :

$$U = - \sum_{i=1}^n m_i * g * p_i$$

De la on peut calculer l'opérateur de Lagrange L :

$$L = T - U$$

Qui obéit à l'équation

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q}$$

Ce qui aboutit à :

$$\tau = B(q) * \ddot{q} + G(q) + C(q, \dot{q}) + F(q, \dot{q}) + K(q, \dot{q})$$

Où : - τ est le Vecteur de couple généralisé

- q, \dot{q} et \ddot{q} sont les vecteurs de position, vitesse et accélération respectivement
- $B(q)$ est la matrice d'inertie du robot dépendant de sa position
- $G(q)$ est le vecteur contenant les termes dus à la gravité
- $C(q, \dot{q})$ est le vecteur avec les termes dû aux effets centrifuges et de Coriolis
- $F(q, \dot{q})$ est le vecteur contenant les termes dus aux effets de frottement
- $K(q, \dot{q})$ est le vecteur de rigidité du robot
- **Le formalisme de Newton Euler** applique les équations de la RFD suivantes :

La somme des forces agissant sur un corps est égale à la masse du corps par l'accélération du centre de masse

$$F = m\ddot{X}$$

La somme des moments agissant sur. Un corps est égal au moment d'inertie du corps par la vitesse et l'accélération angulaires

$$M = I_G \dot{\omega} + \omega \times (I_G \omega)$$

Une des méthodes les plus avancées dans ce domaine est la méthode de Luh, Walker et Paul qui permet le calcul en ligne du modèle dynamique des robots et son inverse sans le calcul explicite des matrices B, G, C, F et Q [2].

6- CHOIX DU ROBOT :

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous allons nous intéresser à un domaine de l'industrie robotisée. La récurrence des applications est un élément fondamental de cet intérêt, il s'agit principalement, du dépôt de colle ou de résine, le soudage, la peinture, les assemblages mécaniques, l'usinage et le fraisage de pièces concaves ou ayant des surfaces curvilignes.

Les points communs des applications précédentes sont :

- Charge utile faible.
- La vitesse et l'accélération de l'effecteur durant la tâche ne sont pas très importantes.
- Nécessité d'une flexibilité de positionnement de l'effecteur, de son orientation ainsi que son déplacement lors de la réalisation des tâches.



FIGURE II.3 soudure à laide d'un robot anthropomorphe à six axes



FIGURE II.4 Robot anthropomorphes collaboratif à six axes



FIGURE II.5 Peinture à laide de robots anthropomorphes à six axes



FIGURE II.6 dépôt de la résine a l'aide d'un robot anthropomorphe à six axes

Le type de robots qui répondent aux critères précédemment motionnés et qui sont largement utilisés dans l'industrie moderne sont *les robots anthropomorphes à six axes* (robot à six axes sériel) tel le KR 210 R2700 extra de KUKA, le Irb 1600 de ABB ou encore le UR5 de la firme Universal robots.

La sérialisation de ce type de robots se présente souvent sous deux configuration, il s'agit de :

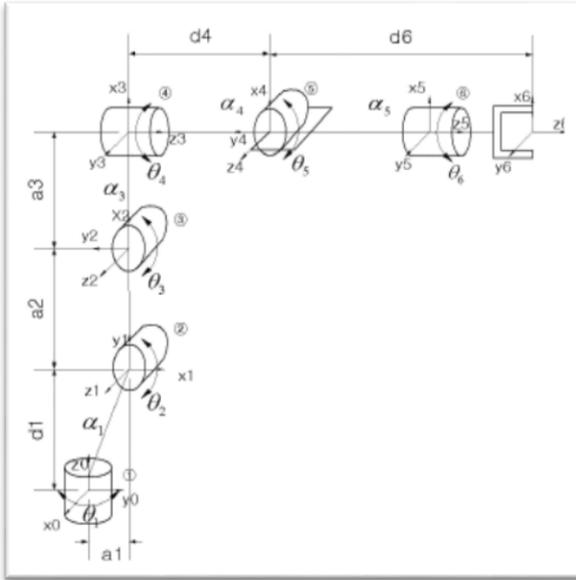


FIGURE II.7 Dispositions des axes d'un robot industriel

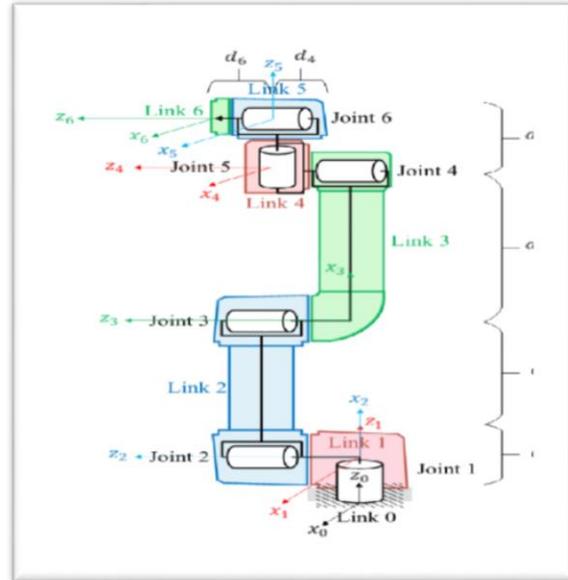


FIGURE II.8 Disposition des axes d'un robot collaboratif

Pour le robot que nous proposons, nous allons adopter un cas particulier de la première sérialisation où on prendra a_1 et a_3 nuls.

La première sérialisation a été adoptée car elle est la plus répandue dans l'industrie.

7- LES PARAMETRES DH :

Le tableau des valeurs des coefficients de Denavit Hartenbergue pour la sérialisation sélectionnée sont exprimés dans le tableau suivant :

| Joints | θ | A | d | α |
|--------|------------|----|----|----------|
| 1 | Θ_1 | 0 | d1 | $\pi/2$ |
| 2 | Θ_2 | a2 | 0 | 0 |
| 3 | Θ_3 | 0 | 0 | $-\pi/2$ |
| 4 | Θ_4 | 0 | d4 | $\pi/2$ |
| 5 | Θ_5 | 0 | 0 | $-\pi/2$ |
| 6 | Θ_6 | 0 | d6 | 0 |

Les matrices de transferts élémentaires sont alors :

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & a_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & -\sin(\theta_3) & 0 \\ \sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le mode géométrique directe s'obtient par la multiplication des matrices précédentes et est égal à :

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$t_{11} = -\sin(\theta_6) * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) - \sin(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) - \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) + \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)))$$

$$t_{12} = \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) + \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) - \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) - \sin(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3)))$$

$$t_{13} = \sin(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) - \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))$$

$$t_{14} = d_6 * (\sin(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) - \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) - d_4 * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) + a_2 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2)$$

$$t_{21} = \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) + \sin(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) + \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) - \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)))$$

$$\begin{aligned}
t_{22} &= \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) + \sin(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \\
&\quad \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) - \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \\
&\quad \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) - \\
&\quad \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2))) \\
t_{23} &= -\sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \\
&\quad \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) - \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \\
&\quad \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)) \\
t_{24} &= a_2 * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) - d_4 * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \\
&\quad \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)) - d_6 * (\sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \\
&\quad \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) + \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \\
&\quad \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2))) \\
t_{31} &= \cos(\theta_6) * (\sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3)) + \cos(\theta_4) * \\
&\quad \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) * \\
&\quad (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) \\
t_{32} &= -\sin(\theta_6) * (\sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3)) + \cos(\theta_4) * \\
&\quad \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) - \cos(\theta_6) * \sin(\theta_4) * \\
&\quad (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) \\
t_{33} &= \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3)) - \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) * \\
&\quad (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) \\
t_{34} &= d_1 + d_4 * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3)) + a_2 * \sin(\theta_2) + d_6 * \\
&\quad (\cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) - \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3)) - \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) * \\
&\quad (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) \\
t_{41} &= 0 \\
t_{42} &= 0 \\
t_{43} &= 0 \\
t_{44} &= 1
\end{aligned}$$

Le modèle géométrique inverse ne sera pas abordé dans cette partie car la méthode utilisée est numérique et nécessite des valeurs numériques pour les dimensions du robot.

8- CONCEPTION DU ROBOT :

La conception du modèle 3D du robot se fera sur SOLIDWORKS principalement. Il faut noter que la conception présentée dans ce chapitre n'est qu'une conception préliminaire qui sera revue et modifiée selon l'application, la motorisation ainsi que la réduction utilisée.

8.1- CONCEPTION DES REDUCTEURS :

La partie la plus importante lors de la conception est la conception des réducteurs cycloïdaux car ils ont une géométrie et un assemblage particuliers.

Pour la cycloïde on devra utiliser la fonction « Equation Driven Curve »

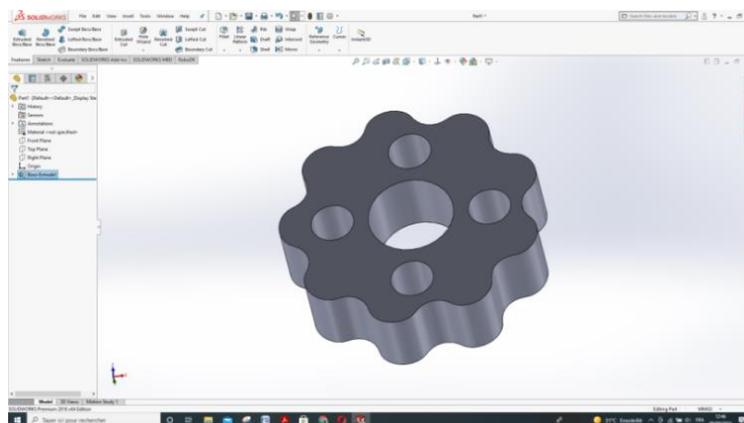
On choisit l'option paramétrique et on insère les équations suivantes respectivement pour X(t) et Y(t) qui sont les courbes paramétrées définissant le contour de la cycloïde en fonction de l'angle « t », cette paramétrisation se fait en fixant « R » le rayon de la couronne, « E » l'excentricité, « Rr » le rayons de pines ainsi que leur nombre « N » ce qui fixera le taux de réduction.

$$X = (R*\cos(t)) - (Rr*\cos(t + \arctan(\sin((1-N)*t)/((R/EN) - \cos((1-N)*t)))) - (E*\cos(N*t))$$

$$Y = (-R*\sin(t)) + (Rr*\sin(t + \arctan(\sin((1-N)*t)/((R/EN) - \cos((1-N)*t)))) + (E*\sin(N*t))$$

Normalement on fait varier le t sur l'intervalle $[0,2\pi]$ mais comme on a choisi l'option « Equation Driven Curve » le résultat sera une courbe et ne peut pas être fermé sur lui-même, il doit contenir un début et une fin donc on fait varier t sur $[0,\pi]$ puis on utilise la fonction miroir pour créer la deuxième moitié du cycloïde et on ajoute une relation de tangence entre les deux courbes pour que le sketch soit bien défini.

On ajoute ensuite le trou central dans lequel le roulement de l'arbre excentrique sera introduit ainsi que les trous dans lesquels les pines de l'arbre de sortie seront insérées. Bien entendu ces trous seront en fonction du roulement choisit et du diamètre des pines et de l'excentricité définie respectivement.



II.9 Cycloïde proprement définis

Une étape de vérification peut être ajoutée pour finaliser la conception de la cycloïde. On dessine les pines de la couronne le long de la périphérie d'un cercle dont le diamètre est celui de la couronne et le centré est décalé de celui de la cycloïde par l'excentricité définie, les cercles devront tous être tangents à la cycloïde.

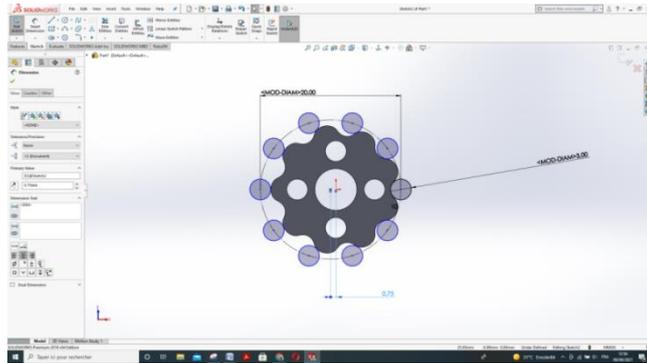


FIGURE II.10 Vérification de la conformité de la cycloïde

Les jeux fonctionnels entre la cycloïde et la couronne, l'épaisseur de la cycloïde, les matériaux et l'état de surface ainsi que le lubrifiant utilisé sont choisis selon la taille du réducteur, la vitesse et la puissance à réduire ainsi que la température ambiante durant le fonctionnement du réducteur. Le choix des paramètres cités ne fait pas l'objet de notre étude et de ce fait ne sera pas précisé.

Le dimensionnement du reste des pièces est simple, l'ensemble des pièces du réducteur en vue éclatée est comme suit :

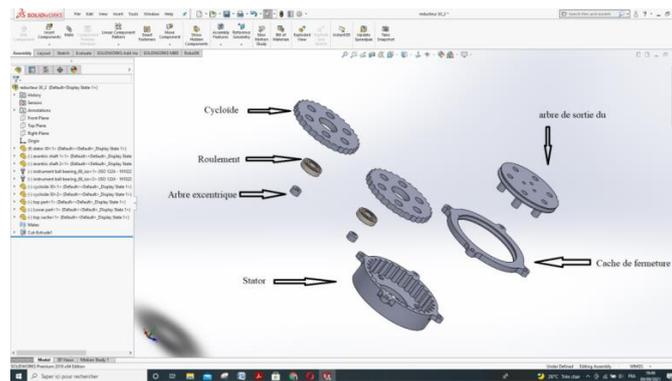


FIGURE II.11 Composant du réducteur cycloïdal

Pour l'assemblage la particularité se trouve dans les relations entre la cycloïde et les pines de la couronne, on choisit deux pines adjacentes et on ajoute deux relations de came entre la cycloïde et les pines choisis.

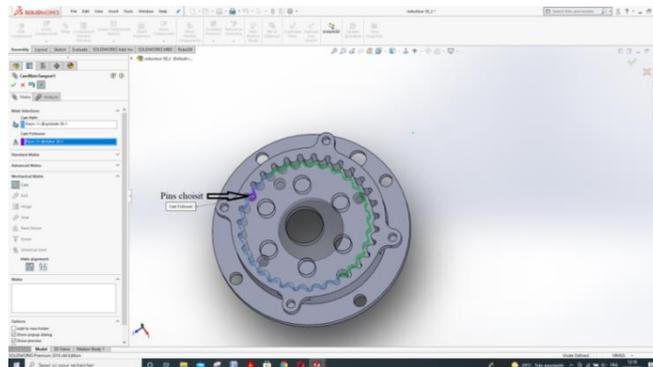


FIGURE II.12 Ajout des relations de came

Les pins de l'arbre de sortie doivent être tangents aux trous présents dans la cycloïde.

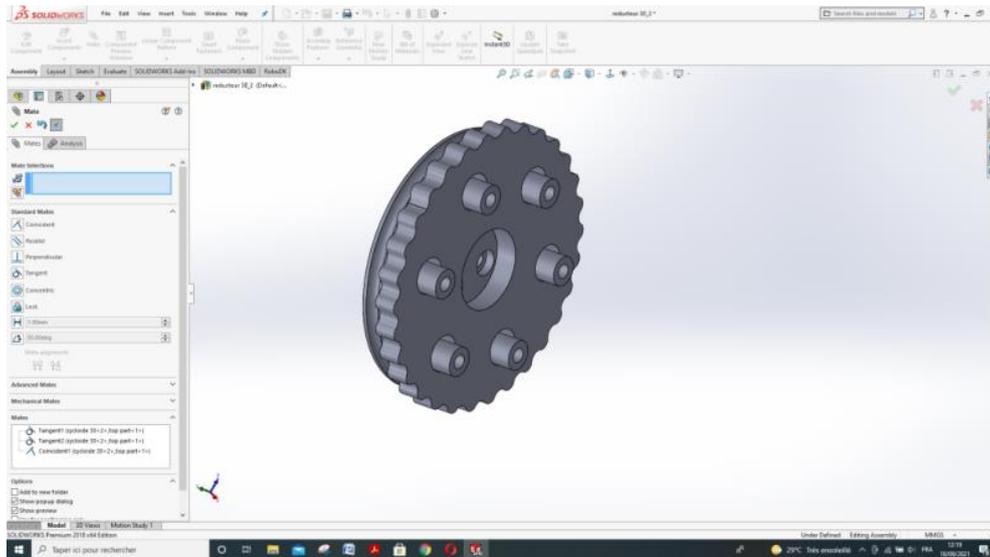


FIGURE II.13 Ajout des relations tangentielles

Le reste de l'assemblage est relativement simple, les axes excentriques des deux cycloïdes du réducteur ont une excentricité déphasé de 180° pour assuré que le balourd crée par l'un des cycloïdes est éliminé par le second, les deux arbres sont concentriques, autour d'eux on ajoute les roulements puis les cycloïdes, l'arbre de sortie se pose sur le cycloïde avec la condition que les pins soient tangents aux trous des deux cycloïdes en même temps puis le cache final se dépose sur le stator pour tenir l'arbre de sortie en place et bien centré par rapport au stator. Au final le réducteur sera comme suit :

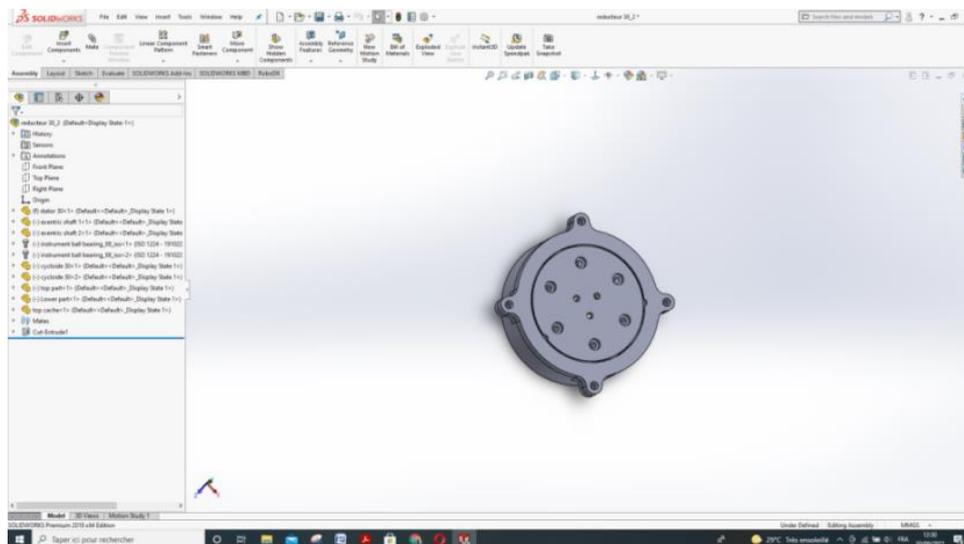


FIGURE II.14 Réducteur assemblé

Les réducteurs conçus préliminairement ont les taux de réduction suivants :

$$R_1 = 15 : 1$$

$$R_2 = 20 : 1$$

$$R_3 = 30 : 1$$

8.2- L'ASSEMBLAGE PRELIMINAIRE :

Pour l'assemblage des autres pièces du robot avec les réducteurs on ajoute une pièce de décalage pour qu'il n'y ait pas de frottements avec le réducteur, l'assemblage se fait avec trois assemblage vis-écrou. On a opté pour cette solution pour faciliter la transmission.

Les pièces sur lesquelles les moteurs seront fixés ont été préliminairement dimensionnées pour les moteurs pas à pas Nema 23, Nema 14 et Nema 11.

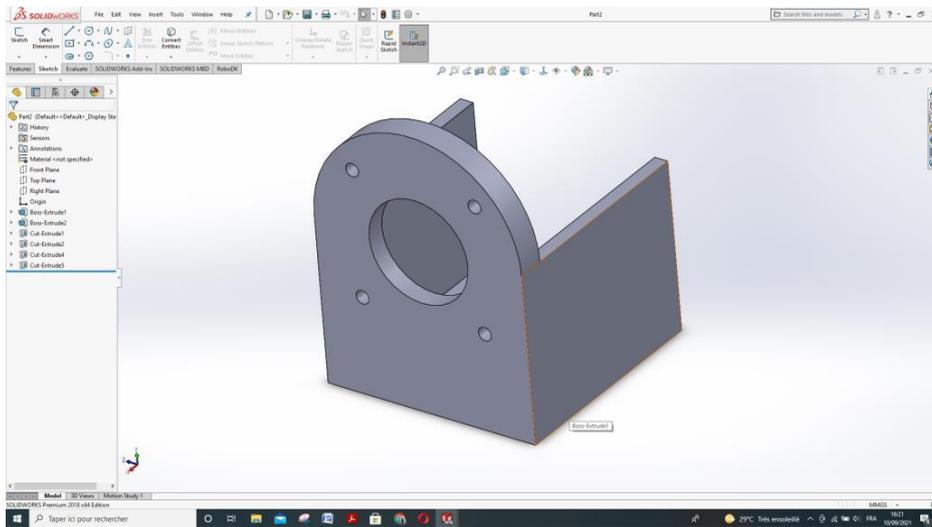


FIGURE II.15 Porte moteur numéro deux

A la fin de la conception préliminaire le robot assemblé est comme suit :

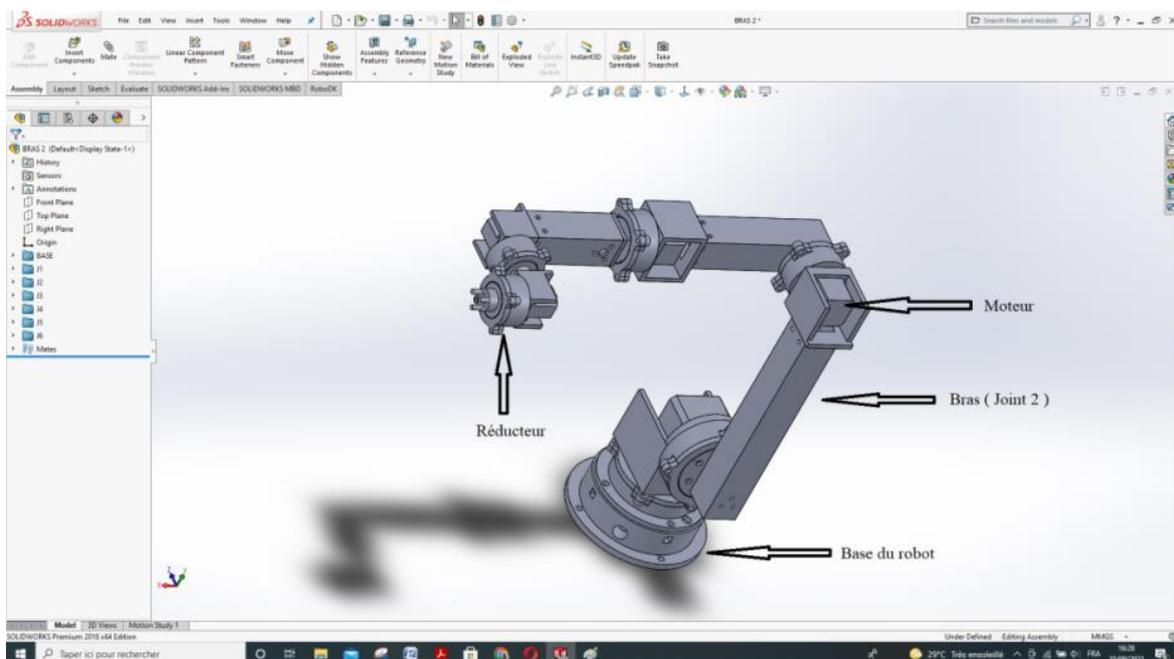


FIGURE II.16 Model préliminaire du robot

9- MODELE GEOMETRIQUE DIRECTE ET INVERSE :

9.1- MODELISATION DU ROBOT SUR « Simscape Multibody Link » :

Dans l'approche pour réaliser le modèle géométrique directe et inverse, nous avons opté dans un premier temps à les réaliser sur MATLAB et plus précisément sur « Simscape Multibody link ». Simscape Multibody Link est un plug-in qu'on installe sur l'application CAO pour exporter les modèles d'assemblage CAO. Le plug-in génère les fichiers dont on a besoin pour importer le modèle dans l'environnement Simscape Multibody (à l'aide de la fonction smimport), ce plug-in est compatible avec trois applications de CAO :

- SOLIDWORKS
- Autodesk Inventor
- PTC® Creo

On importe le modèle CAO en depuis Solidworks vers Simscape Multibody link, ceci convertira les pièces en format Step tout en gardant les relations mécanique entre les corps.

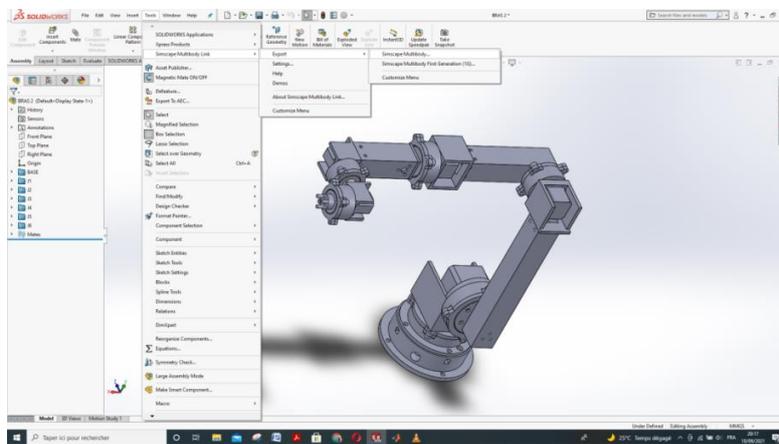


FIGURE II.17 Import du robot sur « Simscape Multibody Link »

La conception du robot sera donc modéliser sous la forme d'un schéma blocks qui prend en considération les relations mécaniques définies lors de l'assemblage.

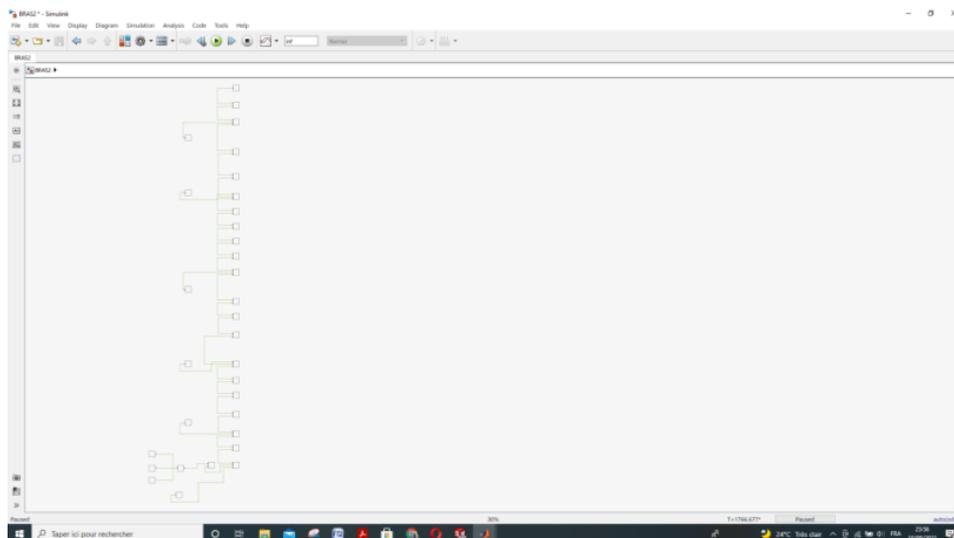


FIGURE II.18 Modélisation du robot sur « Simscape Multibody Link »

A l'intérieur des blocks se trouveront plusieurs relations et contraintes mécaniques, le but est de situer celle qui traduit la rotation de l'arbre de sortie et la commander pour que lors de la simulation le robot n'ait pas de mouvements aléatoires.

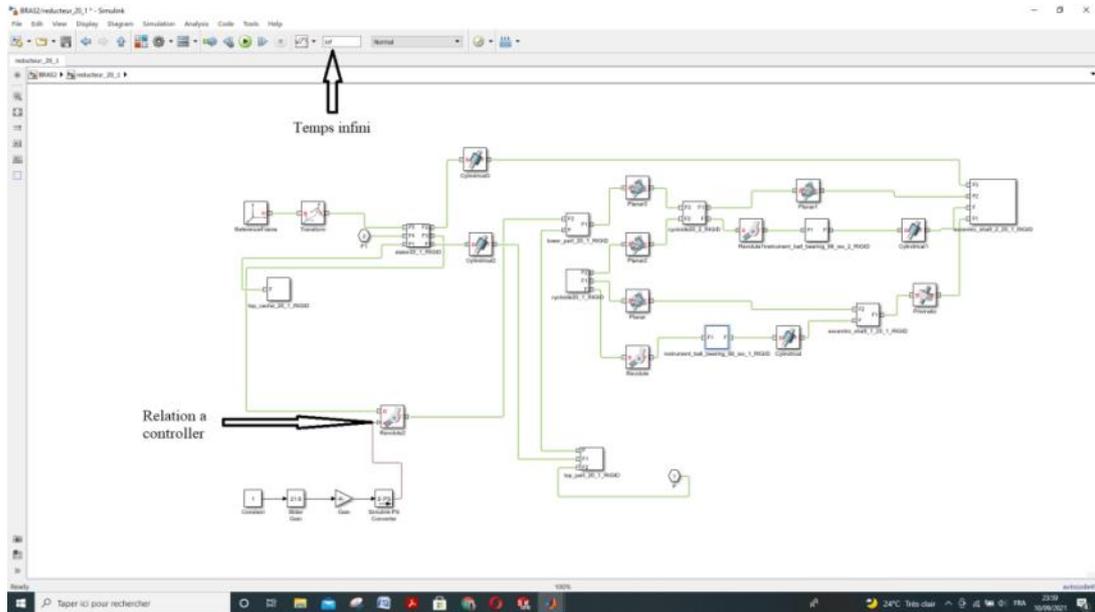


FIGURE II.19 Model du réducteur sur « Simscape Multibody Link »

Après l'ajout des conditions pour le contrôle de la rotation, on fixe le temps de la simulation infinie pour pouvoir travailler sans contraintes, on lance la simulation et un modèle du robot apparait dans le « Editor window » de MATLAB comme suit :

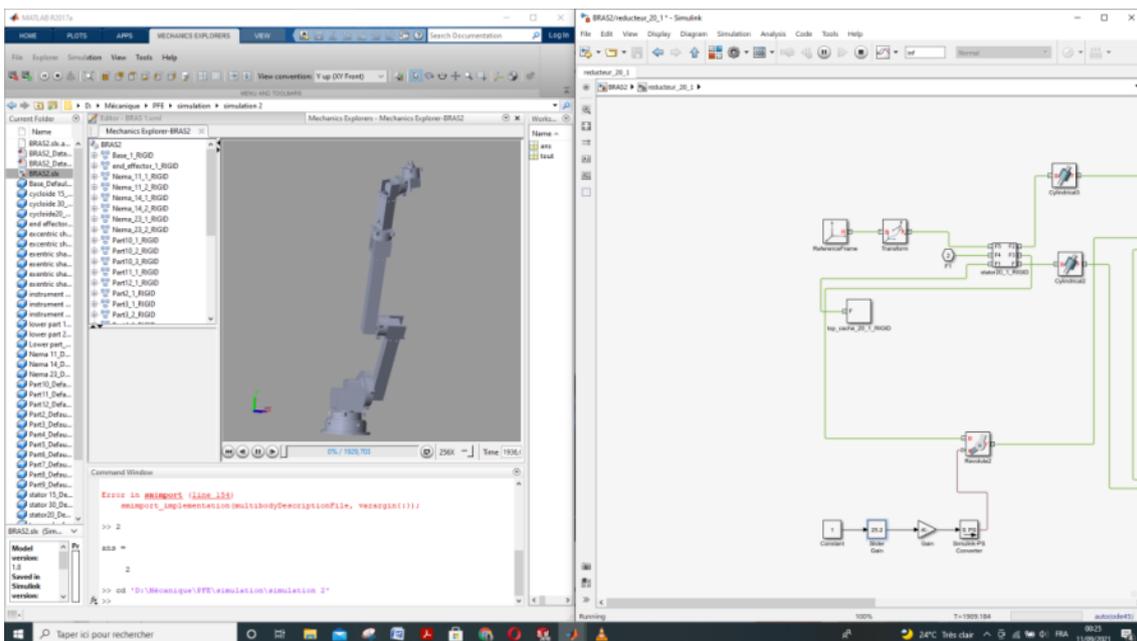


FIGURE II.20 Simulation du robot sur « Simscape Multibody Link »

Le changement de la valeur du curseur contrôlant la rotation du réducteur fait bouger le modèle du robot en temps réel.

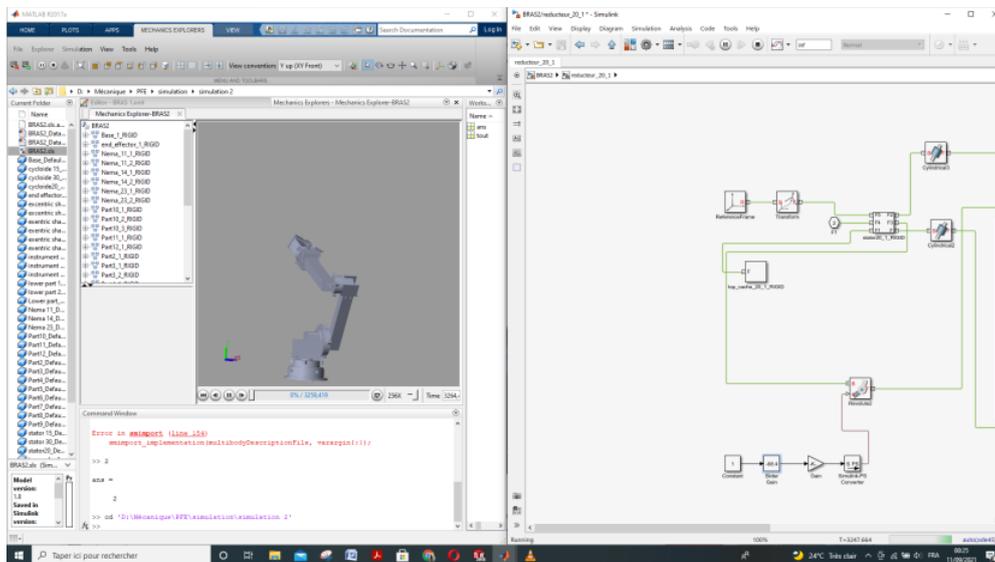


FIGURE II.21 Effet de la commande des relations du robot sur « Simscape Multibody Link »

Idéalement on connecte les curseurs des six réducteurs avec l'input de la fonction « forward kinematics » et les outputs de la fonction « inverse kinematics ». On doit aussi créer les positions X, Y et Z de l'effecteur final qui seront les inputs et les outputs des fonctions « inverse kinematics » et la « forward kinematics » respectivement mais malheureusement nous n'avons pas pu introduire les fonctions dans l'espace du « Simscape Multibody Link » ce qui nous a poussé à changer d'approche et d'utiliser une « Graphical User Interface » ou GUI.

9.2- MODELISATION DU ROBOT A L'AIDE D'UN GUI :

On crée le GUI en utilisant la fonction guide, puis on ajoute six cases de « static text » et six cases de « edit text » pour les six angles du robot. De même on ajoute trois cases « static texte » et « edit text » pour les positions X, Y et Z de l'effecteur final.

Deux « push button » sont aussi ajoutés pour les fonctions du modèle géométrique directe et inverse.

Pour finir le GUI on ajoute finalement une interface graphique pour la modélisation des axes du robot.

Il faut noter que le GUI ne prend pas en considération la conception du robot car il utilise la modélisation des axes selon la convention de Denavit Hartenbergue.

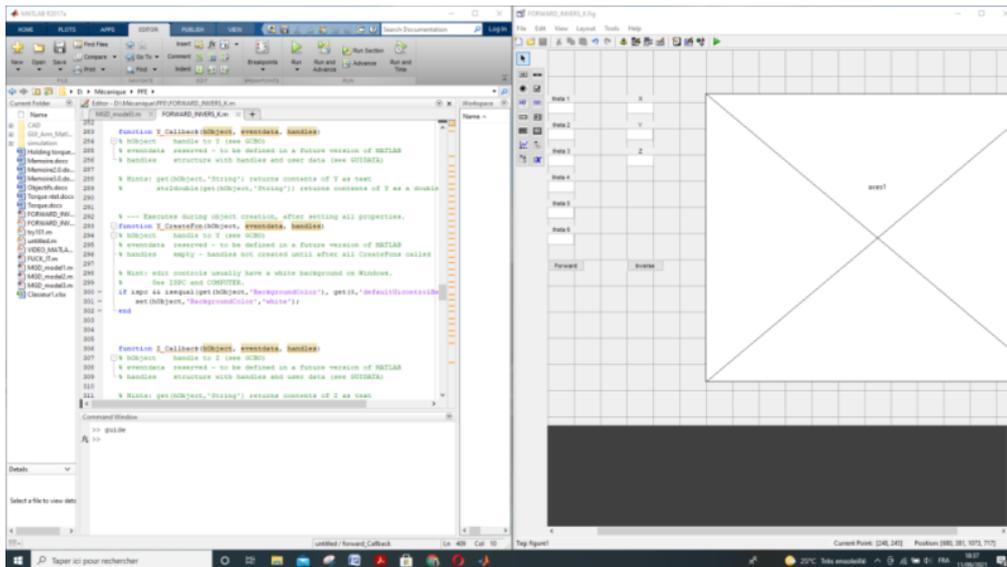


FIGURE II.22 Création du GUI sur MATLAB

La création de chaque élément dans l'interface du GUI ajoute une partie de code qui régit le fonctionnement de cette dernière, après avoir modifié les « tag » des constituants du GUI on ajoute les codes du modèle géométrique directe et inverse aux fonctions d'appel des deux « push button » respectivement.

A présent le GUI est prêt à être mis en marche, on lance la simulation, en remplaçant les valeurs des angles ou bien des positions X, Y et Z de l'effecteur final puis en appuyant sur le bouton Forward ou Inverse respectivement on aura une résolution de notre problème ainsi qu'une modélisation graphique de la disposition des axes du robot.

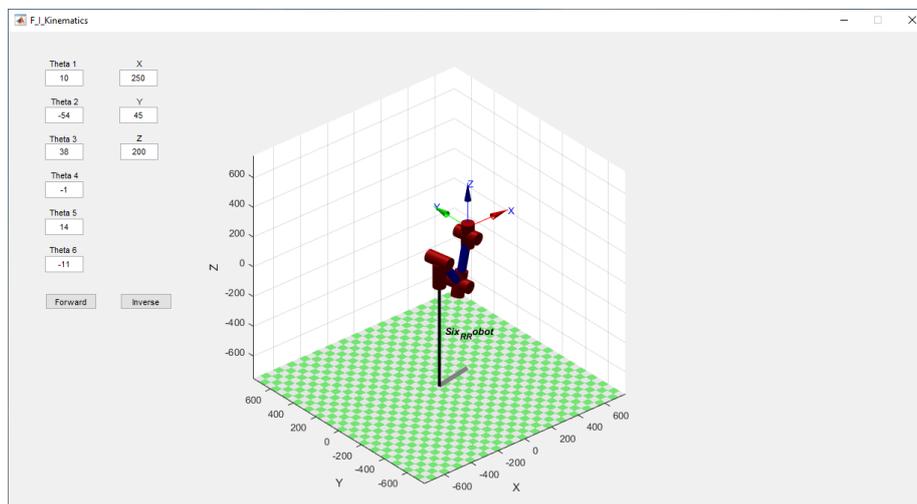


FIGURE II.23 Simulation du robot à l'aide du GUI

Bien que cette méthode résout le problème du modèle géométrique inverse, elle reste incomplète pour les applications industrielles pour les raisons suivantes :

- Elle ne prend pas en compte l'orientation de l'effecteur final qui est très importante pour les applications visées pour cette étude.

- La planification des trajectoires implique la définition d'un nuage de positions ainsi que les orientations désirées pour ces positions ce qui n'est pas optimale si on définit les points de la courbe manuellement.
- Pour chaque position désirée on devra donner une valeur initiale aux valeurs des angles articulaires. Pour certaines positions et orientations les valeurs initiales peuvent engendrer la divergence de la fonction du MGI ce qui demande un choix particulier de ces valeurs pour ces positions.

Pour ces raisons nous allons utiliser un programme avec une interface plus interactive pour les conceptions CAO dans la phase de prototypage nommé ROBODK.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons introduit et développer les modèles mathématiques utiliser pour modéliser le robot et son mouvement, nous avons ensuite réaliser une conception préliminaire du bras et pour finir on a simuler le robot sur matlab.

CHAPITRE III

CONCEPTION FINAL, COMMANDE ET PROTOTYPAGE DU ROBOT

La phase de prototypage vise à mettre en application les connaissances acquises lors de cette étude en réalisant une maquette réduite du robot pour une fonctionnalité choisie.

1- CONCEPTION FINAL

Pour notre étude, nous réalisons un robot pour soudage MIG. Normalement le dimensionnement se fait selon les vitesses et accélérations ainsi que l'espace de travail que le robot doit couvrir et la charge active qu'il doit manipuler, mais dans notre cas et vu le manque d'options disponible sur le marché surtout celles de la motorisation nous avons commencé le dimensionnement en fixant les moteurs pas à pas. Les moteurs que nous avons pu acquérir et qui répondent à nos attentes sont :

- Deux moteurs NEMA 17 42HS48
- Deux moteurs NEMA 17 42HS34
- Un moteur MITSUMI M35SP-8P
- Un moteur ROHS 28BYJ-48

Lors du prototypage, les pièces dont la géométrie est relativement complexe seront réalisées par impression 3D ceci inclus les cycloïdes des réducteurs ainsi que leur couronnes, les pièces portant les moteurs et les arbres excentriques car la réalisation de ces pièces demande des procédés d'usinage auxquels nous n'avons pas accès.

De plus les portes moteurs sont fusionnées aux stators des réducteurs pour avoir un bon entraînement des cycloïdes des réducteurs car la longueur des axes des moteurs est fixe.

Pour débiter le dimensionnement du prototype on conçoit une maquette pour l'effecteur final qui est une torche de soudage MIG ensuite on dimensionne les réducteurs selon le couple nécessaire du sixième moteur jusqu'au premier.

Pour cela on crée des sous-assemblages du robot puis on calcule la masse de ces derniers ainsi que la distance des centres de masses par rapport aux axes des moteurs. Le dimensionnement des réducteurs se fait alors comme suit :

On numérote les moteurs et leurs réducteurs de la base vers l'effecteur final de un à six respectivement.

- **Réducteur numéro six :**
 - Masse du sous assemblage : 34.19g
 - Distance du centre de masse : 26.43mm
 - Le couple nécessaire : 94.5 g.cm
 - Couple du moteur : 300 g.cm

Il est clair que le sixième moteur ne nécessite pas de réducteur.

Il faut noter que les moteurs 28BYJ-48 possèdent des engrenages de réduction par défaut.

- **Réducteur numéro cinq :**
 - Masse du sous assemblage : 165g
 - Distance du centre de masse : 28.67mm
 - Le couple nécessaire : 495 g.cm
 - Couple du moteur : 390 g.cm

On opte pour une réduction de 1 pour 10 ce qui produira un couple de 3900g.cm et nous donnera un coefficient presque de 7.9 fois le couple nécessaire.

- **Réducteur numéro quatre :**
 - Masse du sous assemblage : 755.67 g
 - Distance du centre de masse : 21 mm
 - Le couple nécessaire : 1665 g.cm
 - Couple du moteur : 2800 g.cm

Le réducteur n'est pas nécessaire dans ce cas car le moteur seul peut vaincre la charge du robot

- **Réducteur numéro trois :**
 - Masse du sous assemblage : 1279.83g
 - Distance du centre de masse : 171.56mm
 - Le couple nécessaire : 22020g.cm
 - Couple du moteur : 2800 g.cm

On a opté pour une réduction de 1 pour 25 ce qui produira un couple de 70000 g.cm et nous donnera un coefficient 3.1 fois le couple nécessaire.

- **Réducteur numéro deux :**
 - Masse du sous assemblage : 1887g
 - Distance du centre de masse : 315mm
 - Le couple nécessaire : 59440g.cm
 - Couple du moteur : 5500 g.cm

On a opté pour une réduction de 1 pour 35 ce qui produira un couple de 192500 g.cm et nous donnera un coefficient de 3.2 fois le couple nécessaire

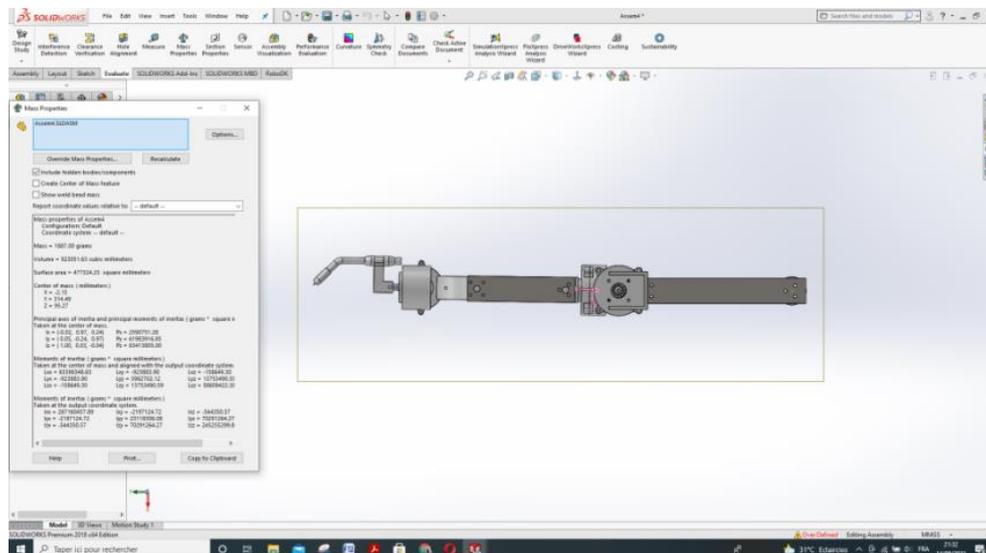


FIGURE III.1 Calcul des propriétés de masses des pseudos assemblages

- **Réducteur numéro un :**
 Pour ce réducteur il est clair que statiquement le moteur ne nécessite pas un réducteur car le couple du moteur est suffisant. Cependant lorsque le bras est complètement étendu le moteur devra développer un couple important lors du mouvement qui surpassera le couple limite du moteur c'est la raison pour laquelle nous allons ajouter un réducteur de 1 pour 35 par mesure de sécurité.

Après modification des réducteurs, le robot final se présente comme suit :

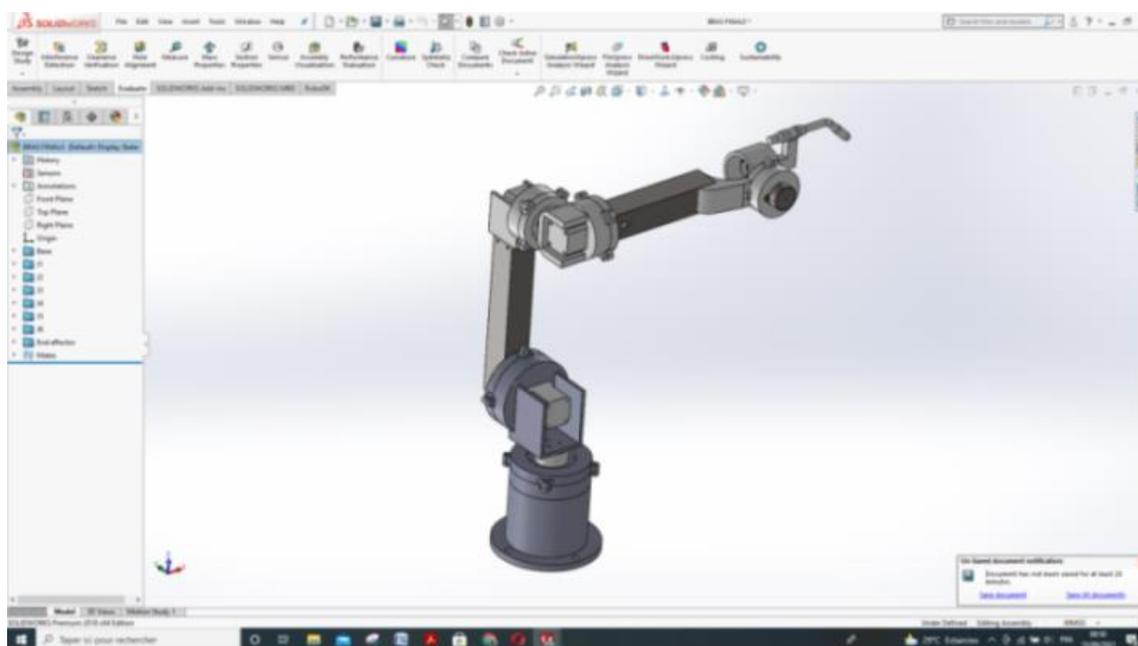


FIGURE III.2 Conception final du robot

Il est clair que la disposition du moteur quatre a été changée pour diminuer le couple nécessaire du troisième moteur. Les moteurs cinq et six ont été réarrangés et la justification de ce réarrangement sera abordé dans ce qui suit, de plus les plans des pièces finales seront ajoutés en annexe.

2- PLANIFICATION DE LA TRAJECTOIRE :

Pour pouvoir mettre le robot en marche on doit générer une trajectoire qu'il doit suivre. Pour cette étape on utilisera un logiciel nommé RoboDK. RoboDK est un logiciel de programmation et de simulation hors ligne pour les robots industriels, le logiciel de simulation peut être utilisé pour de nombreux projets de fabrication, notamment le fraisage, le soudage, la prise et le placement, l'emballage et l'étiquetage, la palettisation, la peinture, l'étalonnage des robots, etc.

Pour importer le robot on doit tout d'abord discrétiser le robot en six « joints » et sauvegarder les conceptions sous format STEP, puis on ouvre les fichiers dans RoboDK, on lie la base du robot à un repère qu'on nomme « Base Ref » et l'emplacement de l'effecteur final à un repère nommé « Tool Ref ».

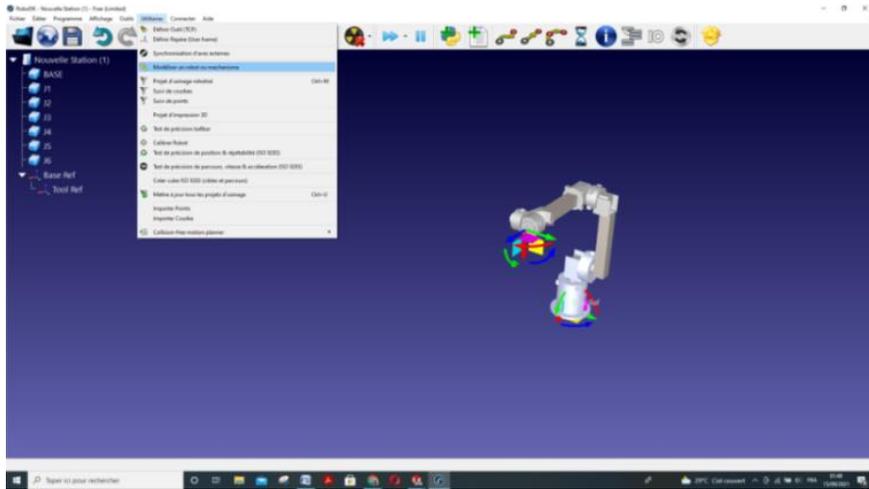


FIGURE III.3 Import du robot sur RoboDK

Puis on utilise la commande de création de robot, on sélectionne le robot industrie, on ajoute la base pour la case de la base et chaque joint dans sa case correspondante. Dans cette étape, on remarquera que les axes quatre et six sont coïtaux dans la définition de RoboDK d'un robot industriel, c'est la raison pour laquelle la disposition des moteurs cinq et six a été modifiée.

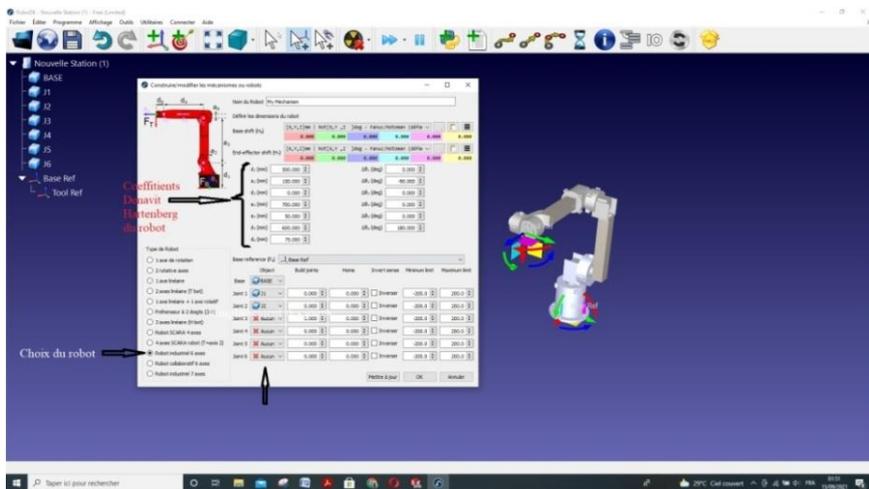


FIGURE III.4 Création du robot sur RoboDK

Lors de la création une réplique du robot apparait avec des curseurs qui contrôlent les angles du robot, un curseur qui peut contrôler la position ou l'orientation de l'effecteur final ainsi que la position du repère de la base et de l'effecteur final.

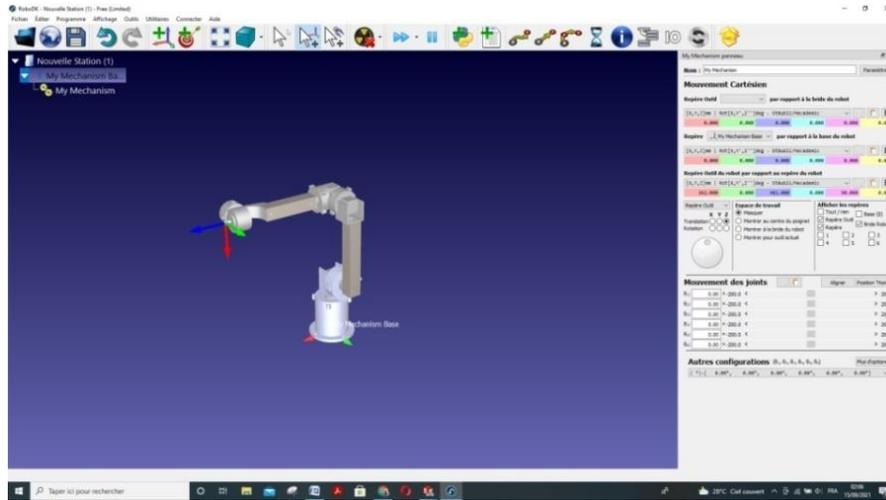


FIGURE III.5 Robot défini sur RoboDK

A présent on ajoute l'effecteur final qui est la torche de soudage. En l'ajoutant sous le robot, elle sera définie comme effecteur final. Par la suite, on peut définir le « tool center point » noté TCP qui est particulier à chaque effecteur selon sa fonction et pour finir la définition du robot on doit imposer les limites angulaires pour chaque articulation.

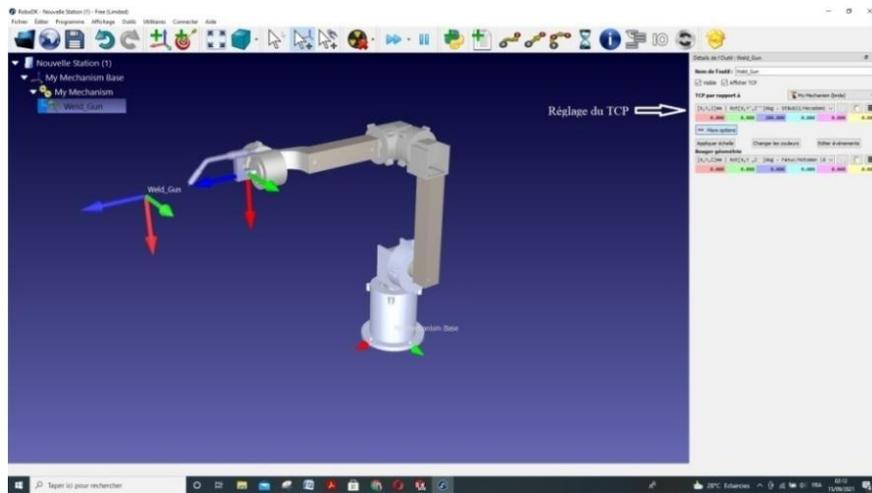


FIGURE III.6 Ajout et la définition du TCP de l'effecteur final

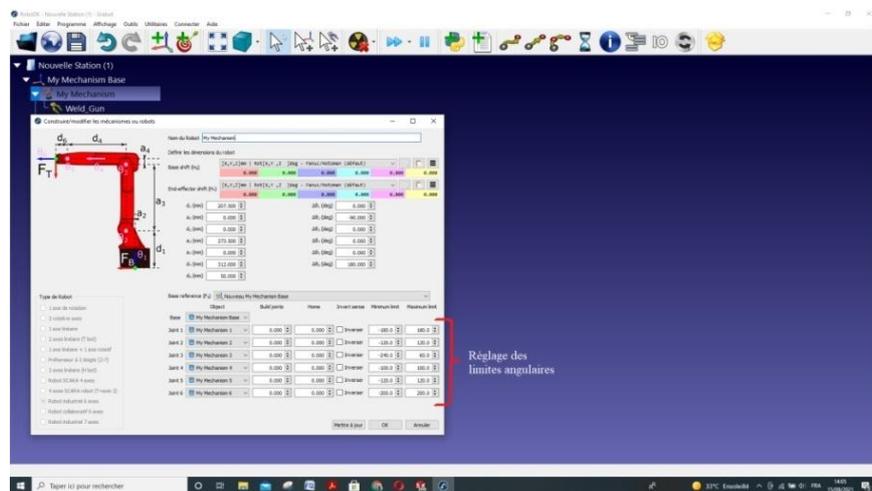


FIGURE III.7 Définition des limites angulaires du robot

Après ces étapes le résultat sera un robot défini parfaitement avec son effecteur final. Il faut noter que lors de l'enregistrement des pièces sous format STEP il est judicieux que les pièces conçues soient bien disposées par rapport au repère de l'espace de conception car celui-ci sera le référentiel des pièces par défaut lors de leur import sur RoboDK.

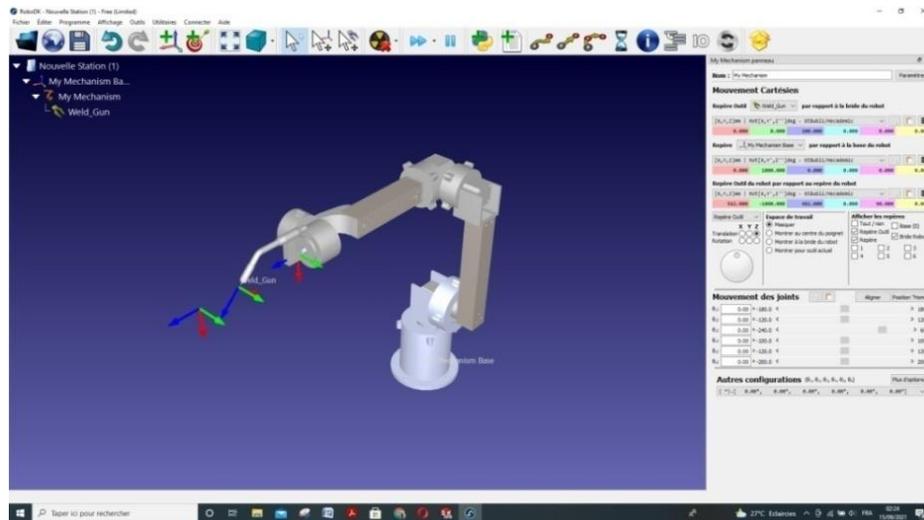


FIGURE III.8 Robot avec effecteur final sur RoboDK

Après la définition du robot vient l'étape pour laquelle nous avons choisis ce logiciel qui est la définition de la trajectoire, pour cela on a plusieurs méthodes proposées par le logiciel mais celle qui nous intéresse et la sélection des courbes à suivre directement en utilisant les modèles CAO.

Pour l'exemple du soudage la trajectoire à suivre sera définie par l'intersection des corps à souder pour cela on importe les corps de SOLIDWORKS sous format STEP, on place les corps devant le robot à l'intérieur de l'espace atteignable par l'effecteur final puis on sélectionne la fonction de suivi de la courbe.

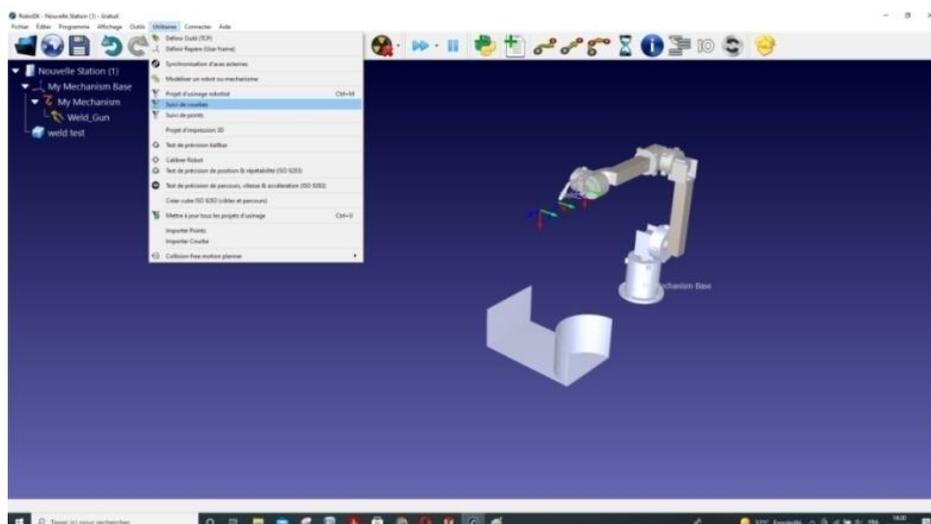


FIGURE III.9 Définition d'un projet de suivi de courbe

Cette fonction nous permet de fixer plusieurs paramètres, la trajectoire à suivre, l'angle avec lequel on souhaite que l'effecteur suive la trajectoire, la vitesse d'avance de l'effecteur final durant le travail, les événements que le robot doit effectuer durant ce suivi tel que le début du

soudage ou la pose des objets soulevés. Cette fonction nous permet aussi de fixer la trajectoire et les vitesses d'approche.

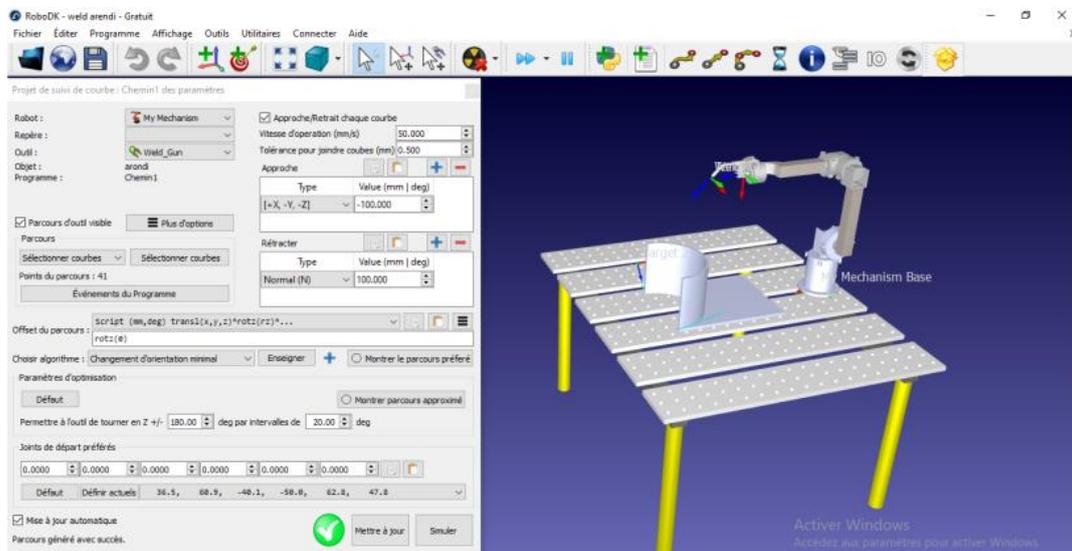


FIGURE III.10 Définition des événements et l'approche du projet

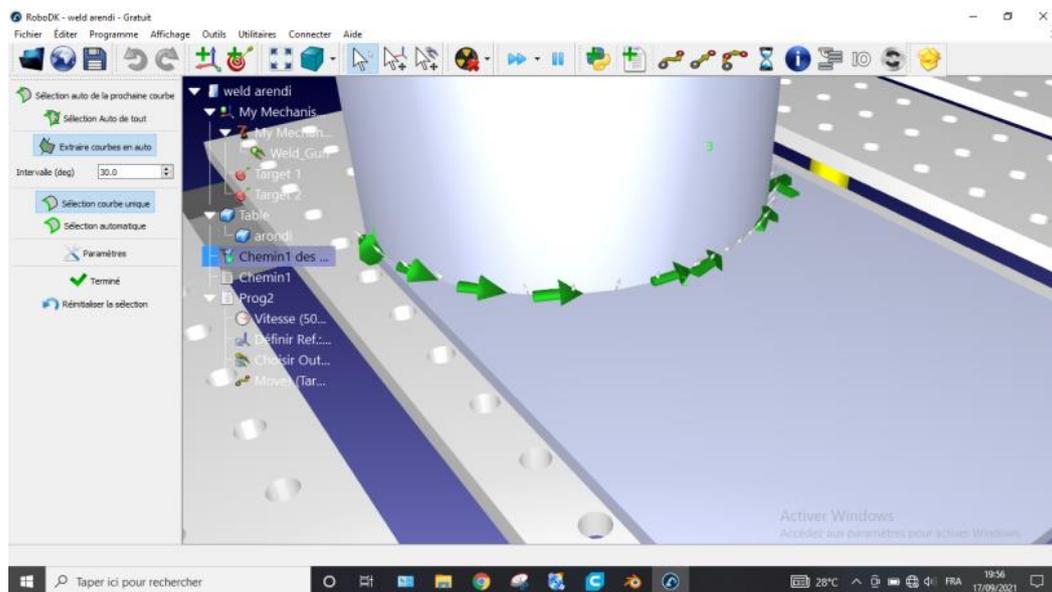


FIGURE III.11 Sélection de la courbe et l'angle d'approche de l'outil final

Après la définition de toutes les caractéristiques de la trajectoire, on n'a plus qu'à la simuler, ceci créera un programme pour cette trajectoire avec tous ses événements. Normalement pour mettre le robot en marche il suffit d'utiliser la commande « envoyer le programme au robot » cependant vu que nous avons utilisé une période d'essai gratuite cette commande ne fonctionne pas. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé une méthode relativement différente, nous avons lancé un enregistrement vidéo de l'écran puis on a lancé la simulation et observé la variation des valeurs articulaires des angles, ces valeurs seront ensuite enregistrées dans un tableau que nous utiliserons ultérieurement.

3- COMMANDE DU ROBOT :

Pour débiter la commande nous allons devoir convertir les angles précédemment enregistrés en nombre d'impulsions que les moteurs devront recevoir.

Ce code nous donne un fichier texte contenant les impulsions des six moteurs. Ce tableau d'impulsions sera injecté dans l'arduino IDE pour commander les moteurs.

- 3.1- STM 32 :** Au début nous avons opté pour une carte ARDUINO UNO mais le code que nous avons utilisé a excédé la RAM de la carte ce qui nous a obligé à remplacer cette dernière avec le STM32[13].

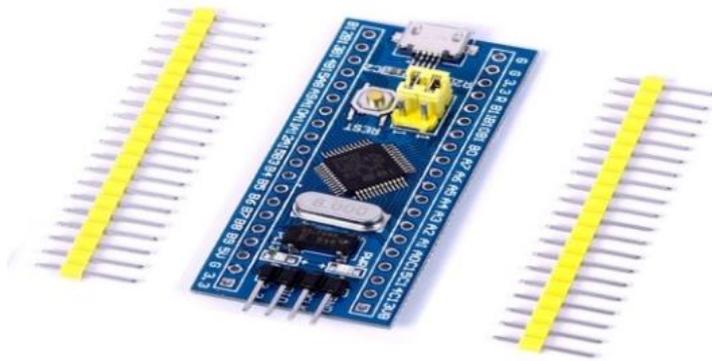


FIGURE III.12 Carte STM32

Pour le contrôle des moteurs nous utilisons les drivers suivants :

- 3.2- A4988 :** Le A4988 est moto variateur complet avec un translateur intégré, il permet la commande des moteurs pas à pas bipolaires avec l'option de microstepping en mode unitaire, demi, quart, huitième ou seizième pas, la sortie peut aller jusqu'à une tension de 35V et un courant de $\pm 2A$.

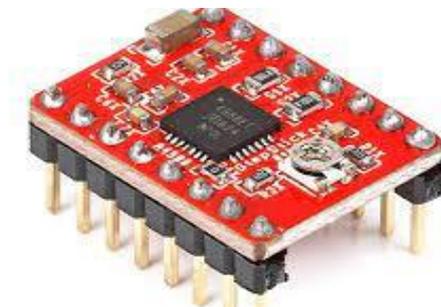


FIGURE III.13 A4988 motor driver

3.3- DM556 : Le DM556 est un pilote pas à pas polyvalent de dernière génération apportant un niveau de douceur élevé au système, fournissant un couple optimal et annulant les instabilités à mi-régime, réduisant le réchauffement des moteurs et les vibrations indésirées[14].



FIGURE III.14 DM556 motor driver

Pour communiquer avec le STM32 nous allons générer un GUI additionnel en utilisant le « C sharp ». Ce GUI nous permettra de faire tourner les articulations comme on le souhaite il contiendra aussi deux boutons qui lanceront les deux simulations des trajectoires rectiligne et circulaire respectivement.



FIGURE III.15 GUI de communication avec le robot

4- PROTOTYPAGE DU ROBOT

4.1- IMPRESSION 3D :

L'impression 3D est une technologie de fabrication par ajout de matière ce qui est le contraire des procédés d'usinage classique. La caractéristique principale de cette technologie est son habilité à réaliser des pièces complexes ou impossibles du point de vue de l'usinage classique.

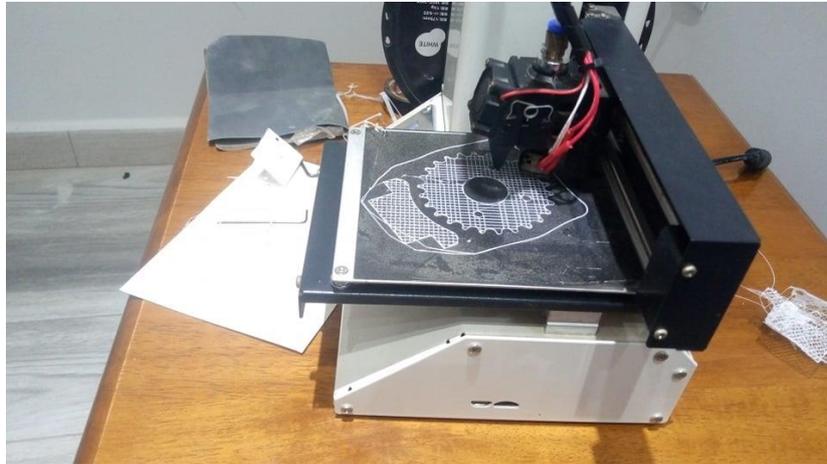


FIGURE III.16 Impression 3D

Les pièces que nous avons imprimées sont :

5. Les axes excentriques des réducteurs.
6. Les cycloïdes des réducteurs.
7. Les couronnes des réducteurs.
8. Les caches de fermeture des réducteurs.
9. La maquette de la torche de soudage.
10. Le porte moteur numéro six.



FIGURE III.17 Pièces réalisées par impression 3D

4.2- LE TOURNAGE :

Certaines pièces ont été réalisées par tournage car c'est nettement plus rapide et efficace que l'impression 3D. Les pièces réalisées par tournage sont :

- Les disques de sortie des réducteurs.
- Les pins des disques des réducteurs.
- La base du robot.



FIGURE III.18 Pièces réalisées par tournage

Après avoir fini, les pins des réducteurs seront taraudés manuellement pour qu'ils soient fixés aux disques de sorties avec des vis.



FIGURE III.19 Taraudage des pins

4.3- L'AJUSTAGE :

Il faut noter que lors de l'impression 3D il peut se produire une erreur de quelques dixièmes de mm ainsi que des états de surfaces qui sont souvent rugueux et parfois endommagés à cause du fonctionnement de l'imprimante qui peut durer parfois une journée complète, les erreurs d'impression sont souvent dues aux erreurs mécaniques de l'imprimante ainsi que la température de la chambre qui régit le refroidissement et le durcissement du plastique d'impression. De plus les jeux fonctionnels des réducteurs n'ont pas été pris en considération c'est la raison pour laquelle un ajustage manuel est nécessaire pour assurer un bon état de surface ainsi que des jeux fonctionnels adéquats garantissant le bon fonctionnement des réducteurs.



FIGURE III.20 Limage de la cycloïde



FIGURE III.21 Ajustage de la cycloïde

4.4- LE CIRCUIT ELECTRONIQUE :

Pour générer le circuit électronique nous schématisant tous les composants et les liaisons du circuit à l'aide du logiciel « EAGLE » puis on utilise la commande « auto-route » pour obtenir le circuit optimisé qu'on imprimera plus tard chez une entreprise spécialisée.

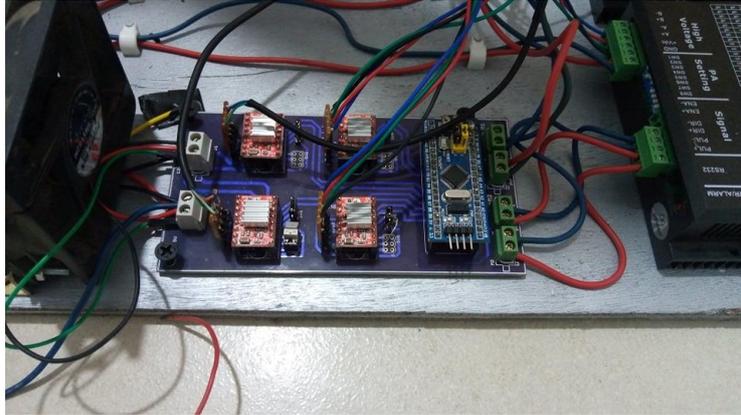


FIGURE III.22 Circuit électronique du robot

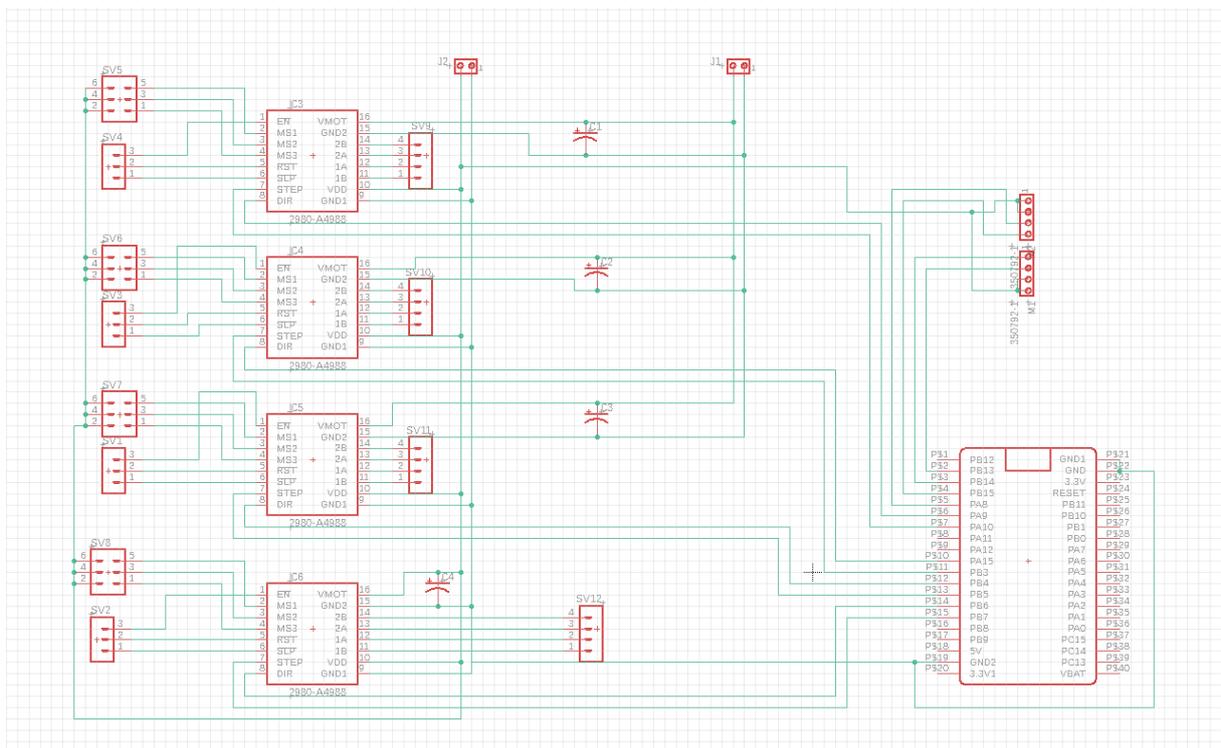


FIGURE III.23 Schéma de la carte électronique

4.5- L'ASSEMBLAGE :

Pour l'assemblage la plupart des étapes sont simples bien qu'ils requièrent souvent deux personnes, la seule partie qui est particulière est l'assemblage des réducteurs, après le fixage du moteur sur le stator, l'ajout de l'axe excentrique et le placement du cycloïde on doit aligner un des trous du cycloïde avec la denture engagé du stator puis on tangente l'un des pignons de l'arbre de sortie avec cette dernière linéairement avec la denture engagé et l'axe du moteur puis on fixe le cache du réducteur avec le stator ce qui nous donne le réducteur dans son état final, l'assemblage du reste nous donne le robot assemblé.



FIGURE III.24 Prototype du robot

5- TESTS :

Suite a l'assemblage nous avons effectué quelques testes sur le fonctionnement du robot et nous avons pu remarquer quelques anomalies que nous allons citer, expliquer et tenter de résoudre.

- 1- La non réversibilité des réducteurs : théoriquement les réducteurs cycloïdaux sont réversibles cependant les réducteurs réalisées ne le sont pas une fois le serrage du cache terminé a cause des états de surfaces très rugueux ainsi que les mauvais jeux fonctionnelles créer manuellement.
- 2- Erreurs des réducteurs : après l'assemblage des réducteurs on remarque une erreur angulaire relativement importante due à la combinaison des erreurs de réalisation et d'ajustage conventionnels et manuelles tandis que les erreurs admissibles pour ce types de réducteurs son de l'ordre de quelques centièmes.
- 3- Déformation des réducteurs deux et trois : sachant que les réducteurs deux et trois sont les réducteurs les plus sollicitées durant le fonctionnement du robot les stators des deux réducteurs se déformées a mesure que les cycloïdes tournées a l'intérieur d'eux ainsi que fléchissement de l'axe du moteur due aux mouvements de ce derniers, pour cela nous avons fortifié le porte stator et moteur ainsi que l'ajout de deux bagues en plastique, la première est extérieur pour renforcé le stator tant que la deuxième est pour tenir le cycloïde dans son emplacement.
- 4- Limitation des angles pour les moteurs deux et trois : a causes des erreurs considérables lors de la réalisation ainsi que les mauvais états de surfaces et les caractéristiques faibles des matériaux en RDM les réducteurs deux et trois qui son les plus sollicitées ne peuvent fonctionner que dans de domaine angulaires restreins, les solutions d'ajout de cotre masses ou de vérin actionner pour diminuer les efforts sur les réducteurs sont des solutions envisageables cependant elles ne feront pas l'objet de cette études.
- 5- Vibrations du robot : lors de son fonctionnement le robot a décrit des mouvements vibratoires indésirables dus aux jeux des réducteurs précédemment ainsi que les accélérations et décélérations trop aigues des moteurs, une étude d'amortissement du mouvement du robot devra être ajoutée dans le futur.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons finalisé la conception du robot en fixant les longueurs des segments du robot en en choisissant les moteurs et leurs taux de réductions respectifs, puis nous avons simuler le robot sur RoboDK et pour finir nous avons réaliser une maquette du robot que nous avons commandé et testé.

CONCLUSION

L'étude que nous avons menée nous a permis d'avoir un aperçu de la robotique industrielle. Ce travail peut être considéré comme une entrée en matière des robots sériels. Il nous a permis de réaliser une conception d'un robot anthropomorphe à six axes ainsi qu'un prototype de ce dernier pour l'application de soudage MIG.

À travers cette étude nous avons pu mettre en application les notions théoriques acquises durant notre cursus, ainsi qu'explorer les nouveautés mécaniques liées à ce domaine et les solutions techniques adoptés.

Pour aboutir à la réalisation du prototype plusieurs tâches ont dû être achevées :

- Choix du type du robot.
- Choix du type des réducteurs et des moteurs.
- Conception et dimensionnement des segments du robot.
- Planification de la trajectoire du robot et simulation.
- Réalisation du prototype.

Durant cette étude nous avons dû surmonter plusieurs challenges ; en particulier dans le choix des logiciels de simulation et l'obtention de leurs licences ainsi que la réalisation du prototype. En effet les moyens de réalisation disponibles ne fournissent malheureusement pas les précisions d'usinage requises par les mécanismes du robot. Cependant nous avons fait de notre mieux pour obtenir un résultat aussi parfait que les outils et procédés de fabrication le permettaient.

Nous espérons que cet humble projet soit le début d'une série d'études d'améliorations, d'optimisation et d'exploration de ce domaine vaste et vierge en Algérie. Il serait intéressant de considérer les points suivants comme des branches à explorer et maîtriser dans le futur :

- L'étude approfondie, l'optimisation et la réalisation des réducteurs.
- L'asservissement du moteur en accélération et en vitesse.
- L'étude du modèle cinématique et dynamique du robot.
- Etude vibratoire du robot.

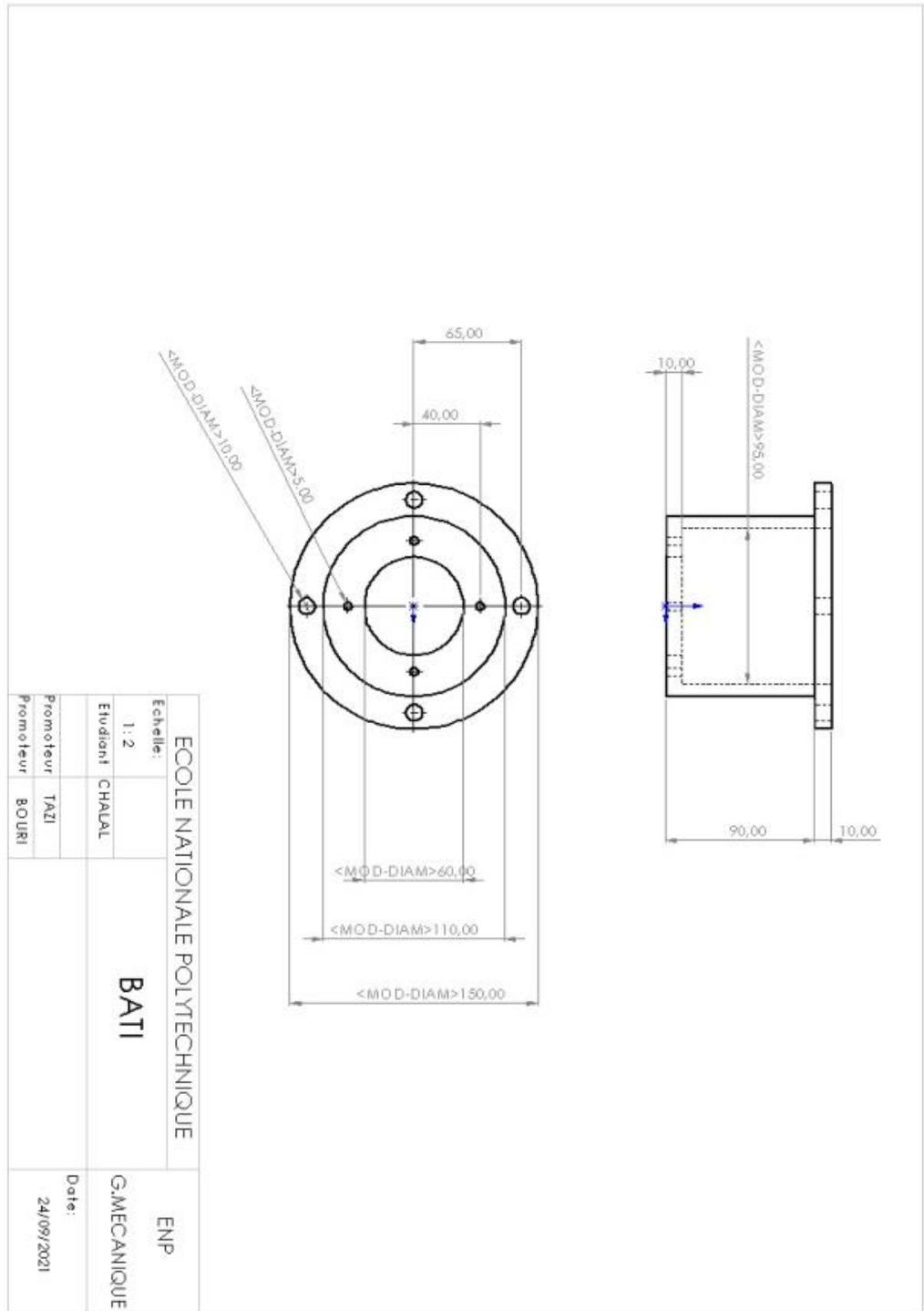
BIBLIOGRAPHIE

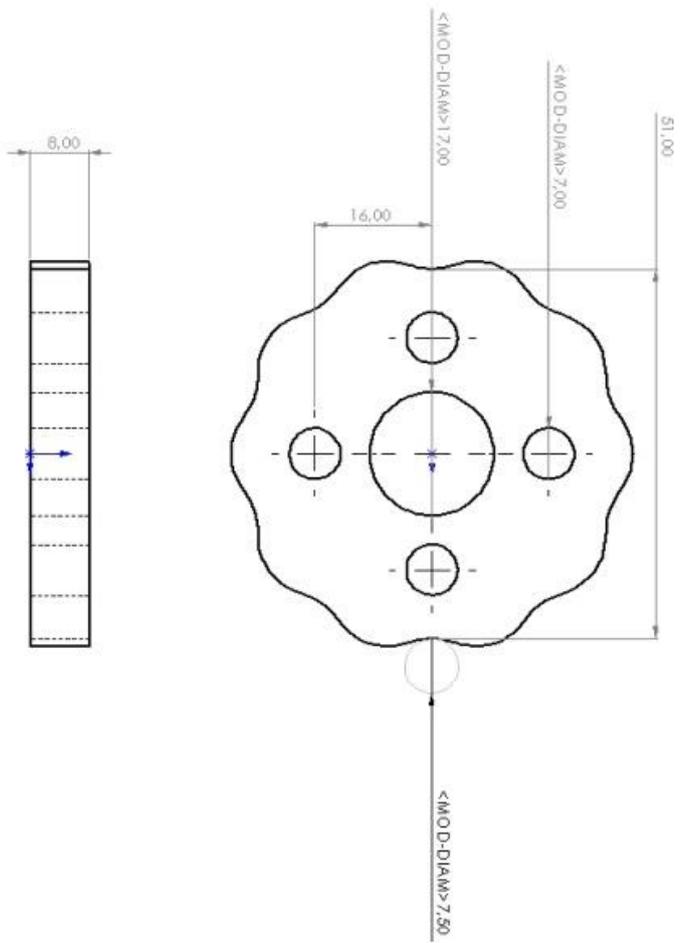
- [1]- « Comment choisir un robot industriel ? » *Direct INDUSTRY*, s. d.
- [2]- Hage, Hiba. « Identification et simulation physique d'un robot Stäubli TX90 pour le fraisage à grande vitesse ». HAL archive-ouvertes, 6 juin 2013.
- [3]- HAMDI, Hocine. « INTRODUCTION A LA ROBOTIQUE ». université Mentouri _Constantine, 2003.
- [4]- Kercha, Mébarka. « Commande par mode de glissement d'un Moteur pas à pas à Aimant Permanent ». UNIVERSITE DE BATNA, 14 décembre 2005.
- [5]- « Le marché mondial de la robotique industrielle progresserait de 12,5 % d'ici 2027 ». *Mesures*, 12 février 2021.
- [6]- MORBIDI, Fabio. « Robotique Industriel », 2017.
- [7]- M.Ziegler, et C.S.G.Lee. « AGEOMETRIC APPROCH IN SOLVING THE INVERSE KINEMATICS OF PUMA ROBOTS ». Departement of Electrial and Computer Engineering, The university of Michigan, 1983.
- [8]- Omar Abdelaziz, Minzhou Luo, et Guanwu Jiang. « MULTIPLE CONFIGURATIONS FOR PUNCTURING ROBOT POSITIONING ». International Journal of Advance Robotics & Expert Systems (JARES) Vol.1, No.4, s. d.
- [9]- Panchanand, JHA. « Inverse Kinematic Analysis of Robot Manipulators ». NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA, INDIA, juillet 2015.
- [10]- « Robot - Définition et Explications ». *Techno-Science.net*, s. d.
- [11]- « Stepper Motor. 28BYJ-48 Datasheet ». *DatasheetsPDF.com*, s. d.
- [12]- « Stepping Motors. M35SP-8 Datasheet ». *DatasheetsPDF.com*, s. d.
- [13]- « STMicroelectronics MCU ARM® Cortex™-M3 STM32 ». *MOUSER ELECTRONICS*, s. d.
- [14]- « User's Manual For DM556 Fully Digital Stepping Driver ». Leadshine Technology Company Limited., 2009.
- [15]- Younis, Omar. « Building a Cycloidal Drive with SOLIDWORKS », s. d.
- [16]- *Gearbox Design IV (Cycloidal Drive 1)*, s. d.
<https://www.youtube.com/watch?v=vYmF4hZzFhI>.

- [17]- *Mat lab Tutorials : Forward and Inverse kinematics Position Analysis of 6 DOF Robot*, s. d. <https://www.youtube.com/watch?v=TdCJIm0MP4&t=2s>.
- [18]- *Simscape Multibody Link Plug-in in SolidWorks*, s. d. https://www.youtube.com/watch?v=SQorCJ_o3M4.
- [19]- *Detailed Assembly Guide for a Very Compact 48:1 Cycloidal Drive*, s. d. <https://www.youtube.com/watch?v=aTiBB2n-pNQ>.

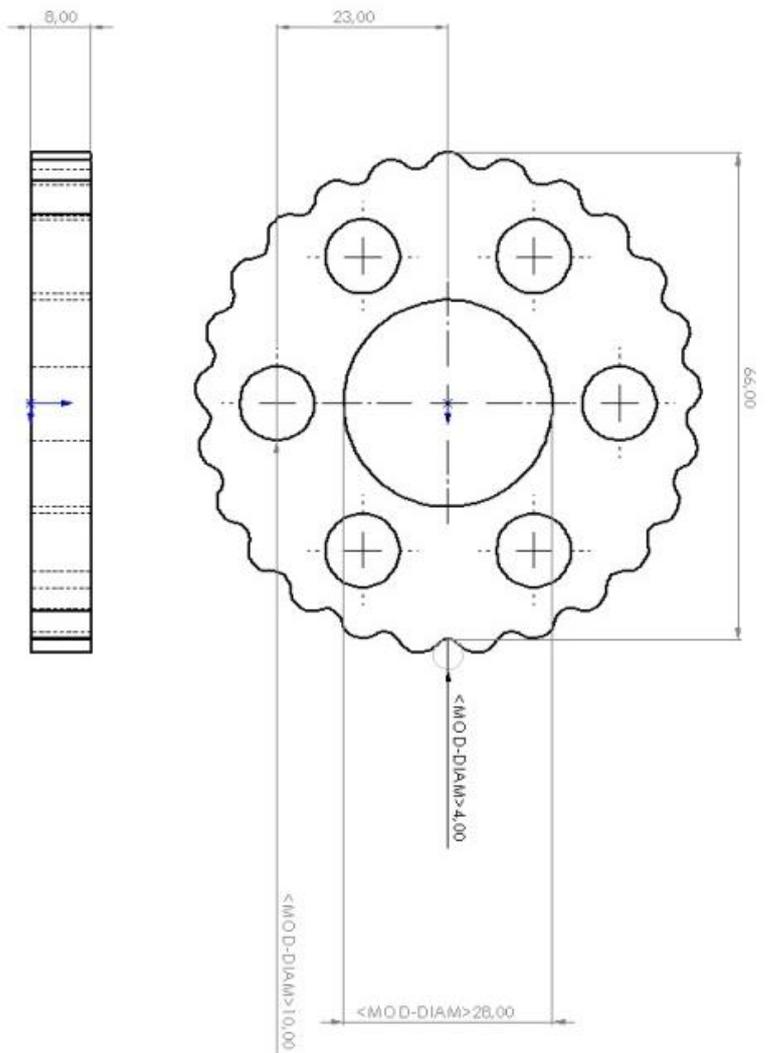
ANNEXES

1- PLANS DES PIECES



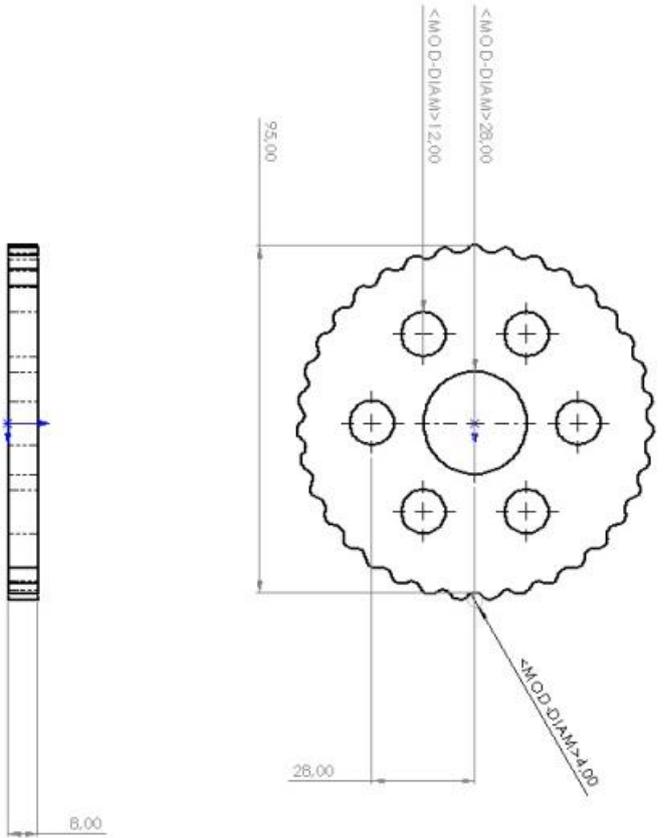


| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | G.MECHANIQUE |
| Etudiant: | CHALAL | |
| Promoteur: | TAZI | Date: |
| Promoteur: | BOURI | 24/09/2021 |

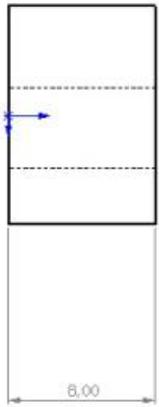
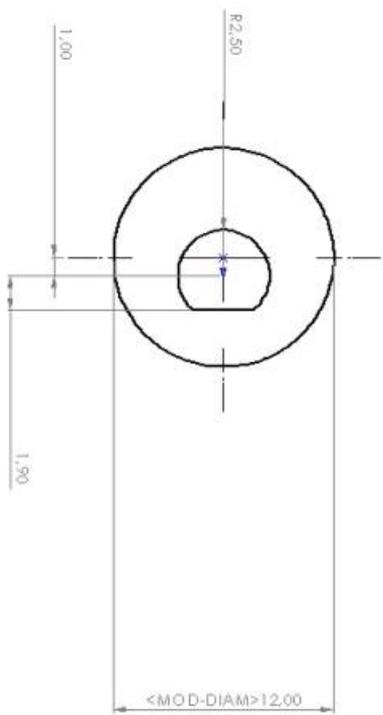


| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | G.MECHANIQUE |
| Etudiant | CHALAL | Date: |
| Promoteur | TAZI | 24/09/2021 |
| Promoteur | BOURI | |

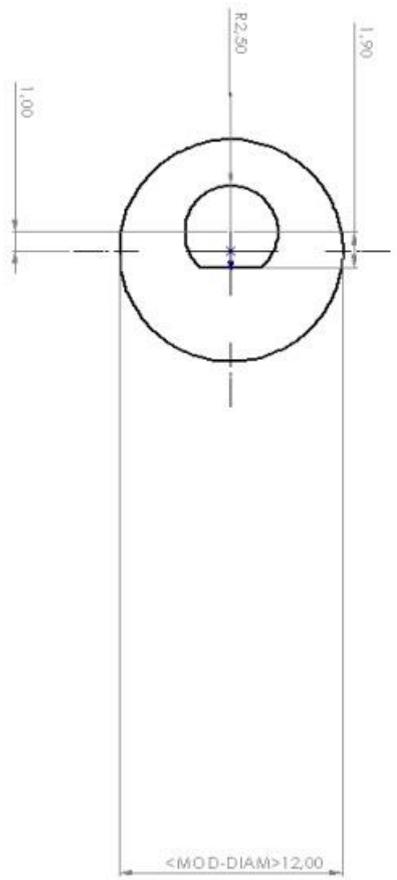
Cycloïde 25



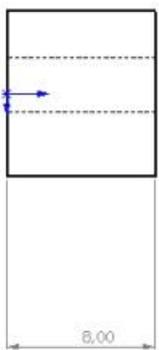
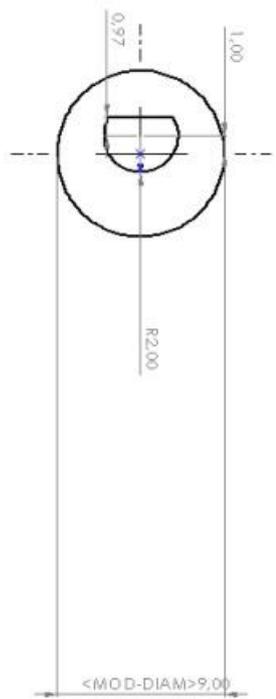
| | | | |
|-------------------------------|--------|----------------------|--|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP | |
| Echelle: | 1:1 | <h1>Cycloïde 35</h1> | |
| Etudiant | CHALAL | | |
| Promoteur | TAZI | | |
| Promoteur | BOURI | Date: 24/09/2021 | |



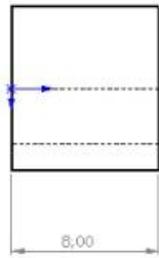
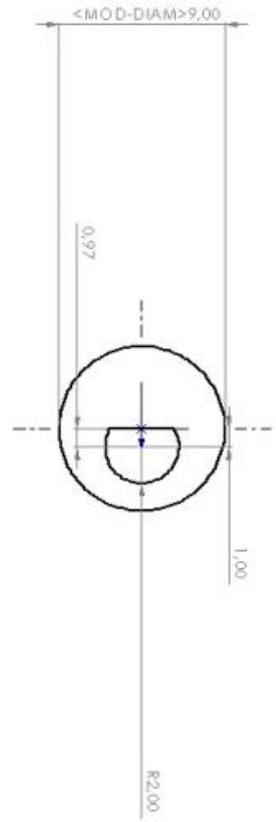
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | S1 | |
| Etudiant | CHALAL | |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| Excentric shaft 1 | | G.MECHANIQUE |
| Date: | | 24/09/2021 |



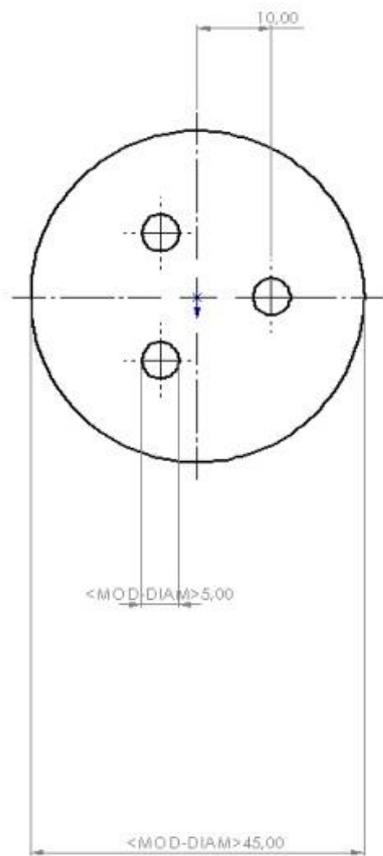
| | | |
|---|--------------------------|-----|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE Echelle: 5:1 | | ENP |
| Etudiant CHALAL | Excentric shaft 2 | |
| Promoteur TAZI | G.MECCANIQUE | |
| Promoteur BOURI | Date: 24/09/2021 | |



| | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ENP | |
| Echelle: 5:1 | G.MECCANIQUE |
| Etudiant CHALAL | Excetric shaft 10 1 |
| Promoteur TAZI | Date: 24/09/2021 |
| Promoteur BOURI | |

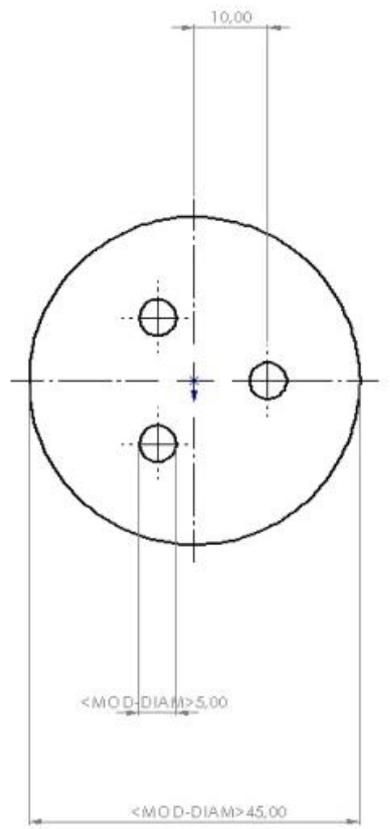


| | | | |
|---|--|---|--|
| <p style="text-align: center;">ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE</p> | | <p style="text-align: center;">ENP</p> | |
| <p>Echelle: 5:1</p> | <p style="text-align: center;">Excentric shaft 10 2</p> | | |
| <p>Etudiant: CHALAL</p> | <p>GMECANIQUE</p> | | |
| <p>Promoteur: TAZI</p> | <p>Date: 24/09/2021</p> | | |
| <p>Promoteur: BOURI</p> | | | |

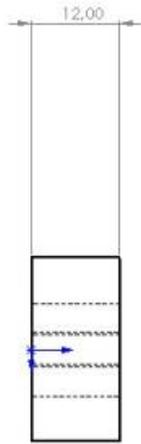
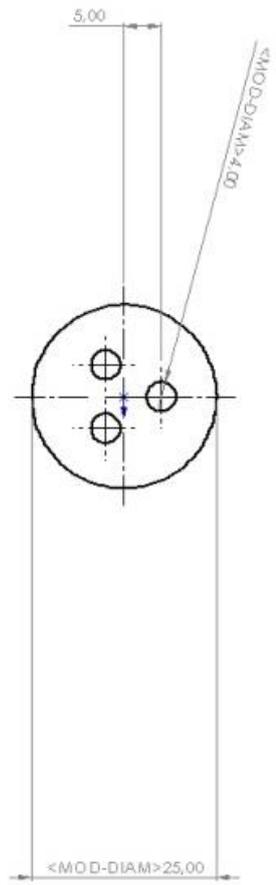


| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | G.MECCANIQUE |
| Etudiant: | CHALAL | Date: 24/09/2021 |
| Promoteur: | TAZI | |
| Promoteur: | BOUFI | |

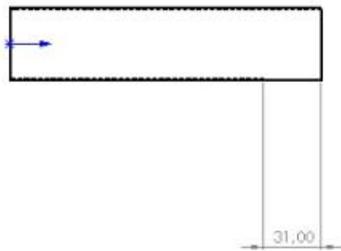
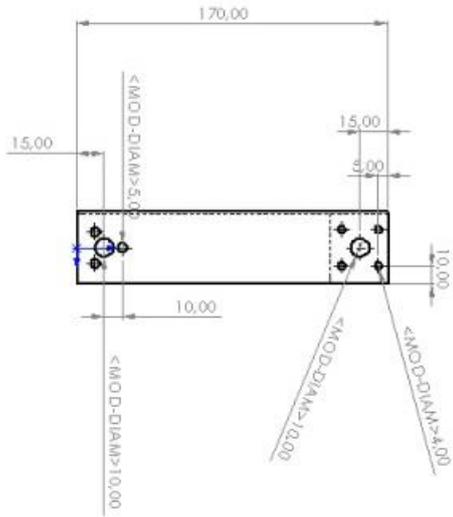
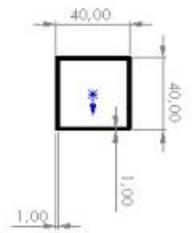
Offset1



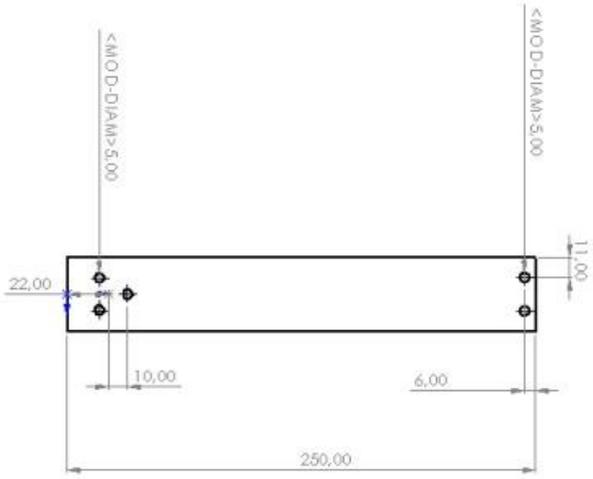
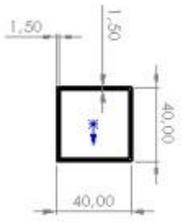
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | |
| Etudiant | CHALAL | Offset2 |
| Promoteur | TAZI | G.MECHANIQUE |
| Promoteur | BOURI | Date: |
| | | 24/09/2021 |



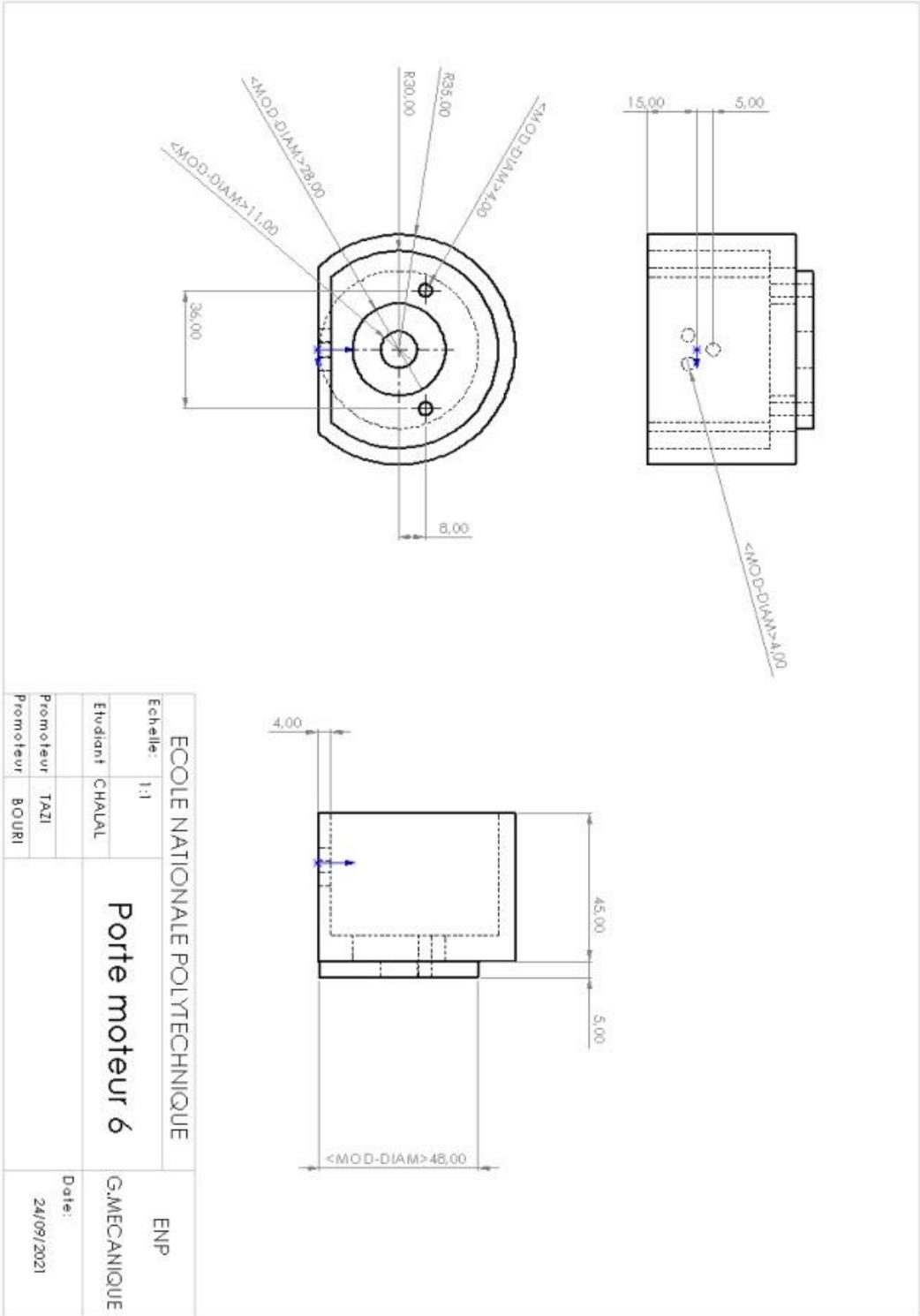
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | G.MECCANIQUE |
| Etudiant | CHALAL | |
| Promoteur | TAZI | Date: |
| Promoteur | BOURI | 24/09/2021 |

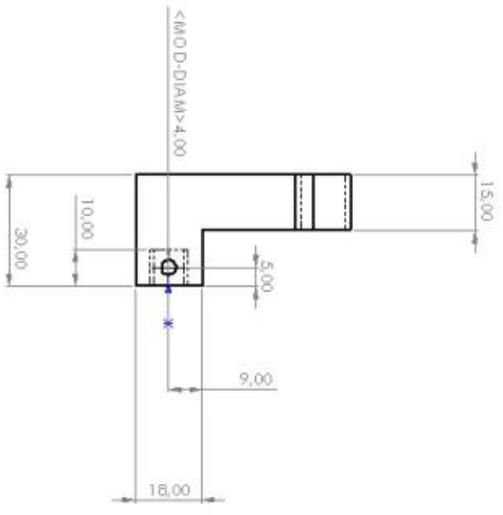
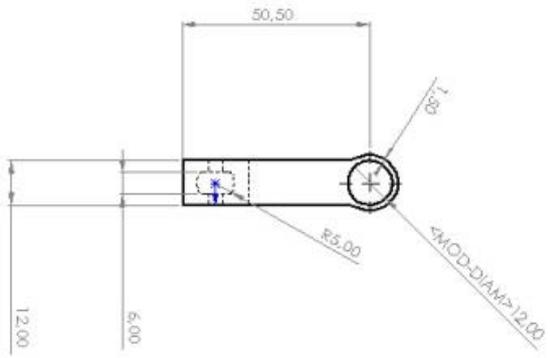


| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:2 | Part 1 |
| Etudiant: | CHALAL | |
| Promoteur: | TAZI | |
| Promoteur: | BOURI | Date: 24/09/2021 |



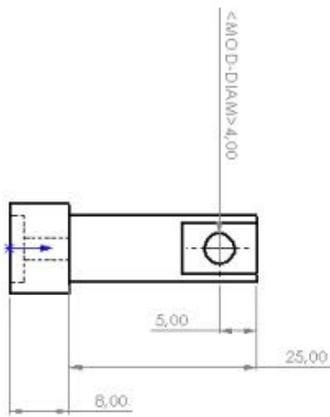
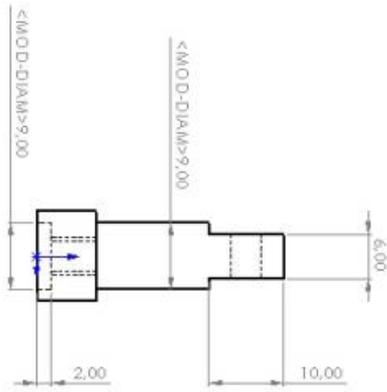
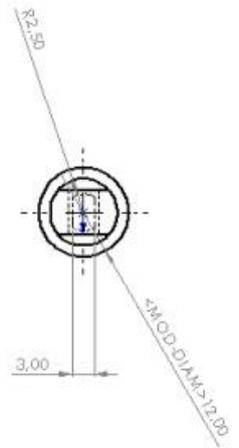
| | | |
|--------------------------------------|------------------|------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: 1:2 | Part 3 | |
| Etudiant CHALAL | G.MECANIQUE | |
| Promoteur TAZI | Date: 24/09/2021 | |
| Promoteur BOURI | | |



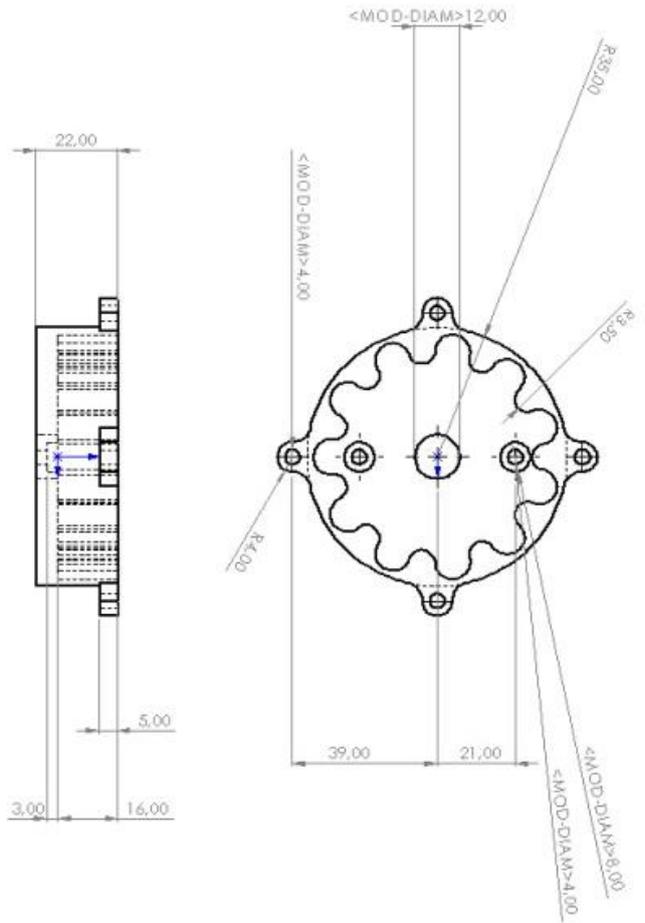


| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:1 | G.MECHANIQUE |
| Etudiant | CHALAL | Date: |
| Promoteur | TAZI | 24/09/2021 |
| Promoteur | BOURI | |

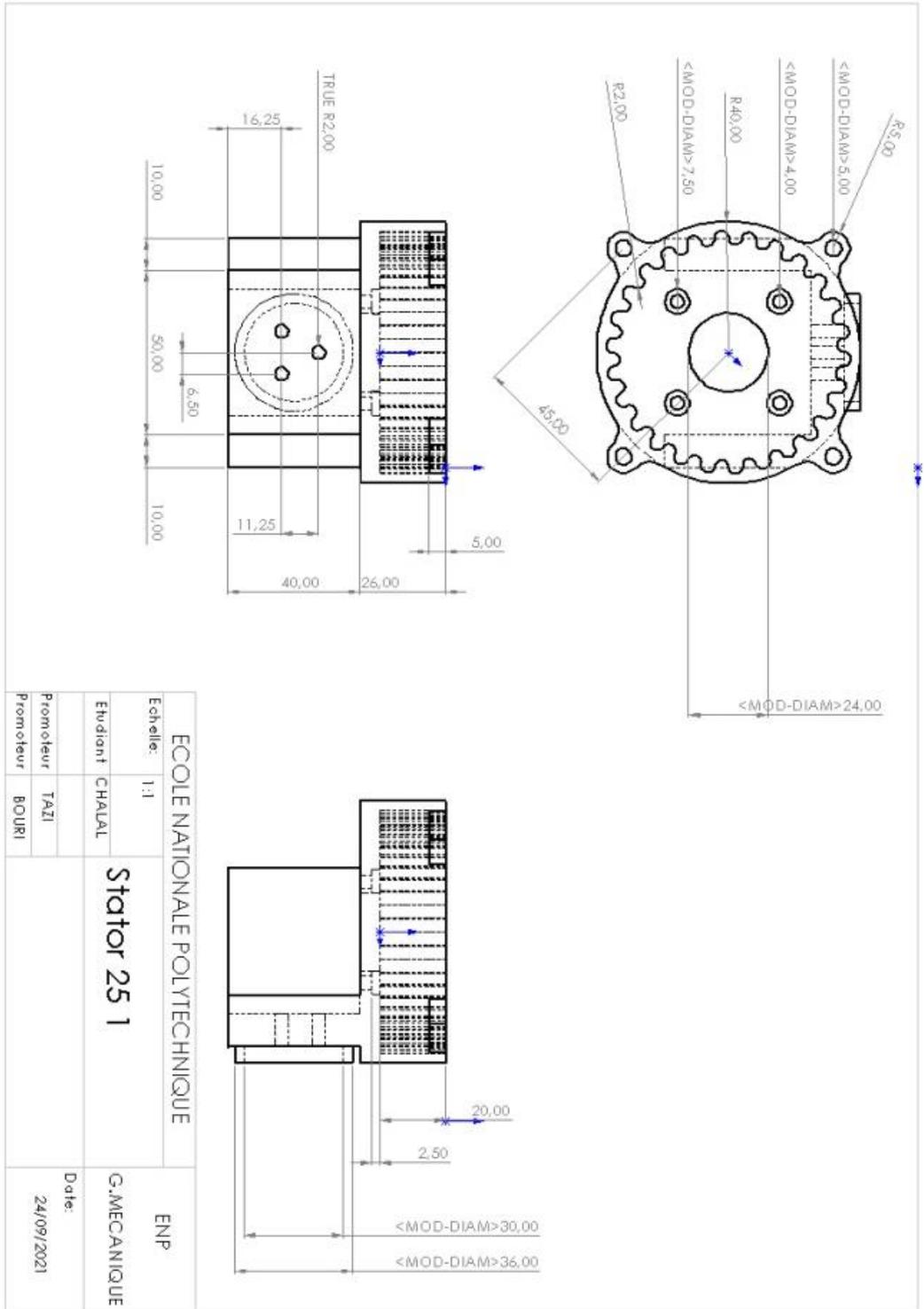
Porte Torche



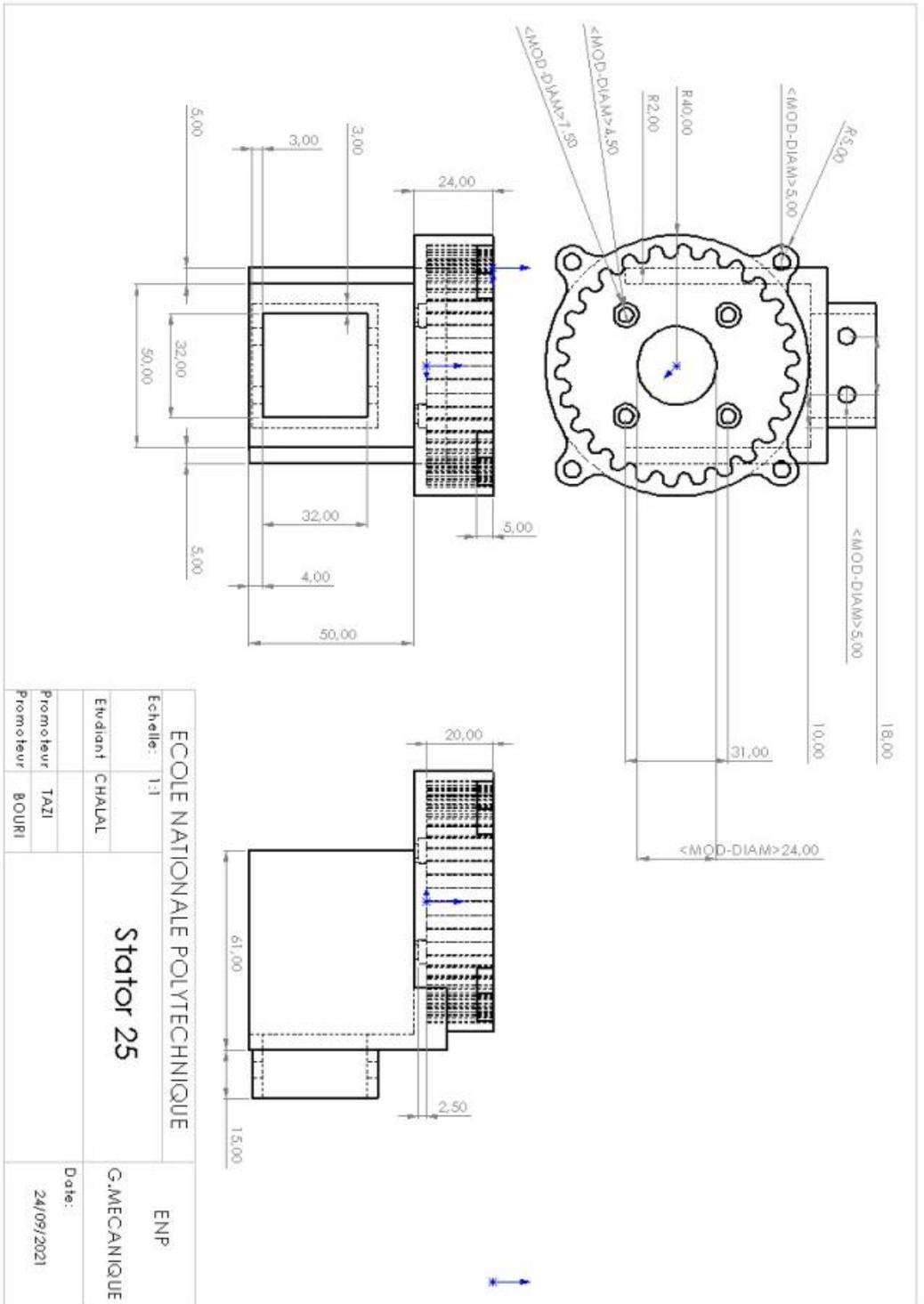
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | |
| Etudiant | CHALAL | Shaft |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| | | Date: |
| | | 24/09/2021 |

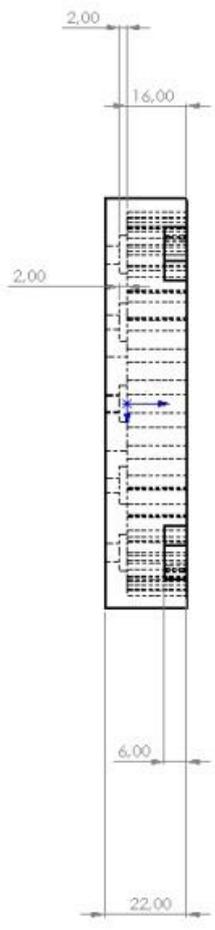
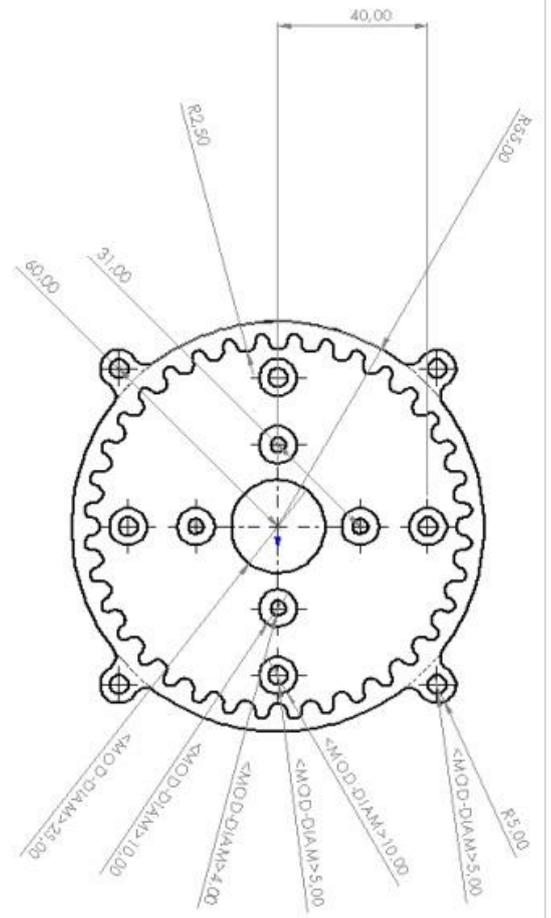


| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:1 | G.MECCANIQUE |
| Etudiant: | CHALAL | Date: 24/09/2021 |
| Promoteur: | TAZI | |
| Promoteur: | BOURI | |
| Stator 10 | | |

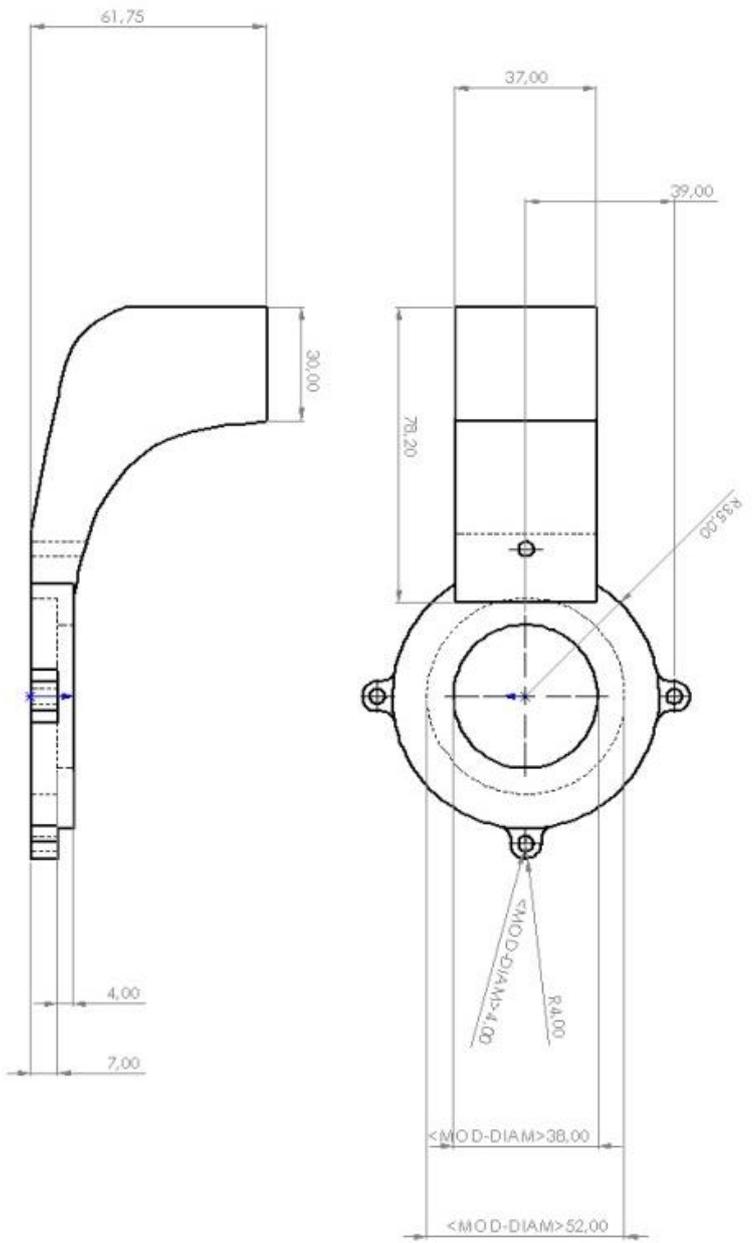


| | | | |
|-------------------------------|--------|--------------------|--|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP | |
| Echelle: | 1:1 | G.MECHANIQUE | |
| Etudiant | CHAVAL | Stator 25 1 | |
| Promoteur | TAZI | Date: | |
| Promoteur | BOURI | 24/09/2021 | |

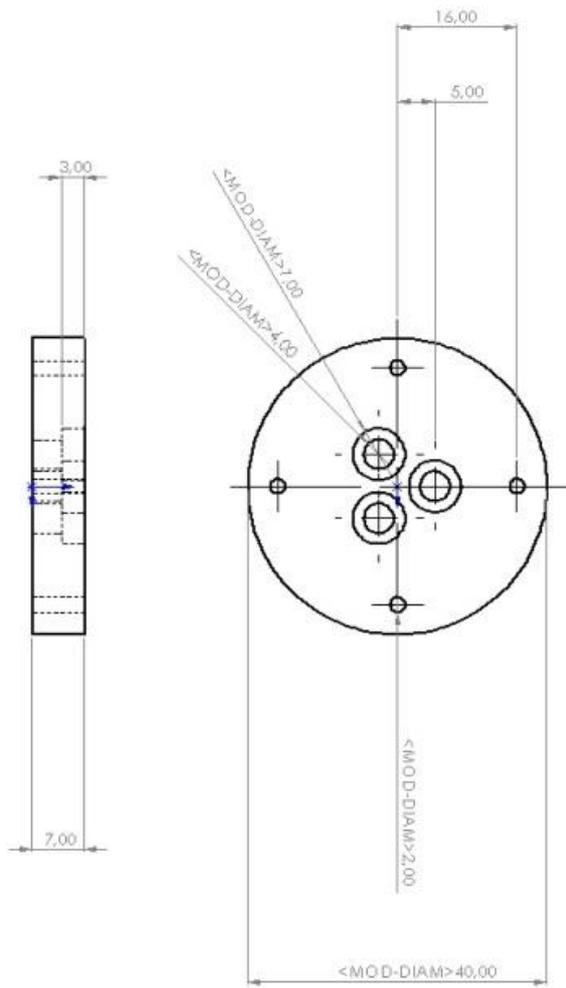




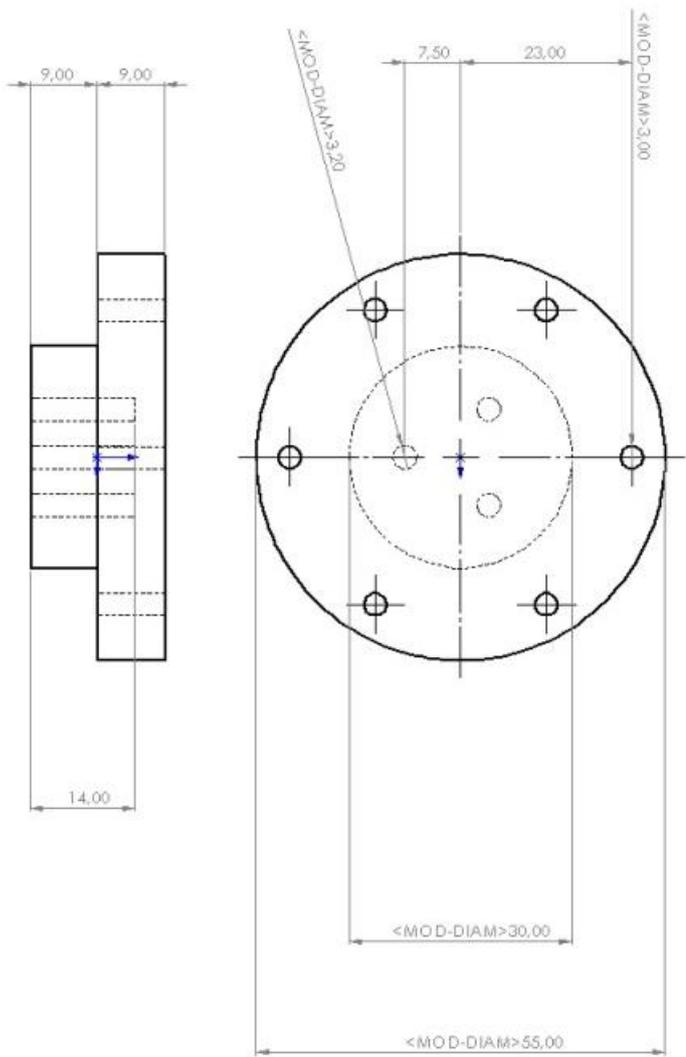
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:1 | G.MECHANIQUE |
| Etudiant | CHALAL | Date: |
| Promoteur | TAZI | 24/09/2021 |
| Promoteur | BOURI | |



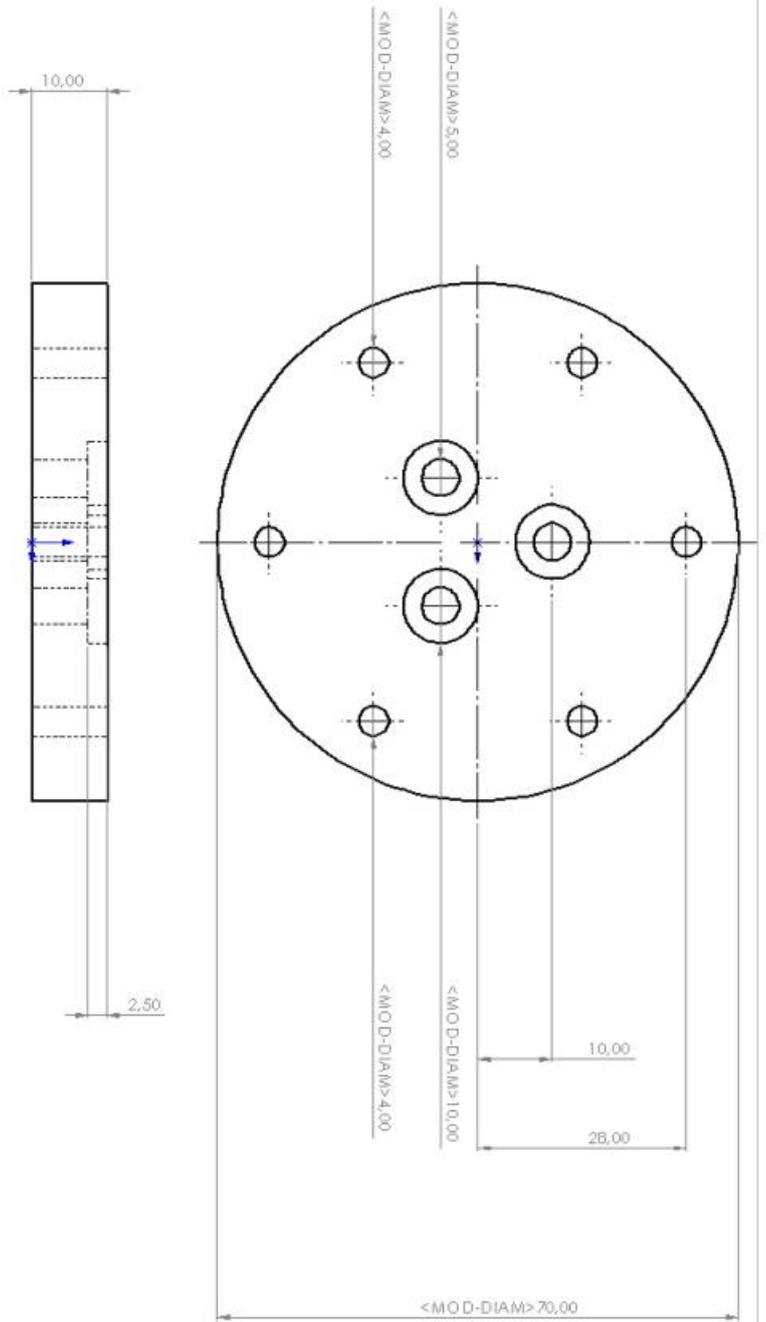
| | | | | | |
|---------------------|--|-------------------------------|--|--------------|--|
| Echelle: | | ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP | |
| Etudiant | | CHALAL | | G.MECHANIQUE | |
| Promoteur | | TAZI | | Date: | |
| Promoteur | | BOURI | | 24/09/2021 | |
| Top cache 10 | | | | | |



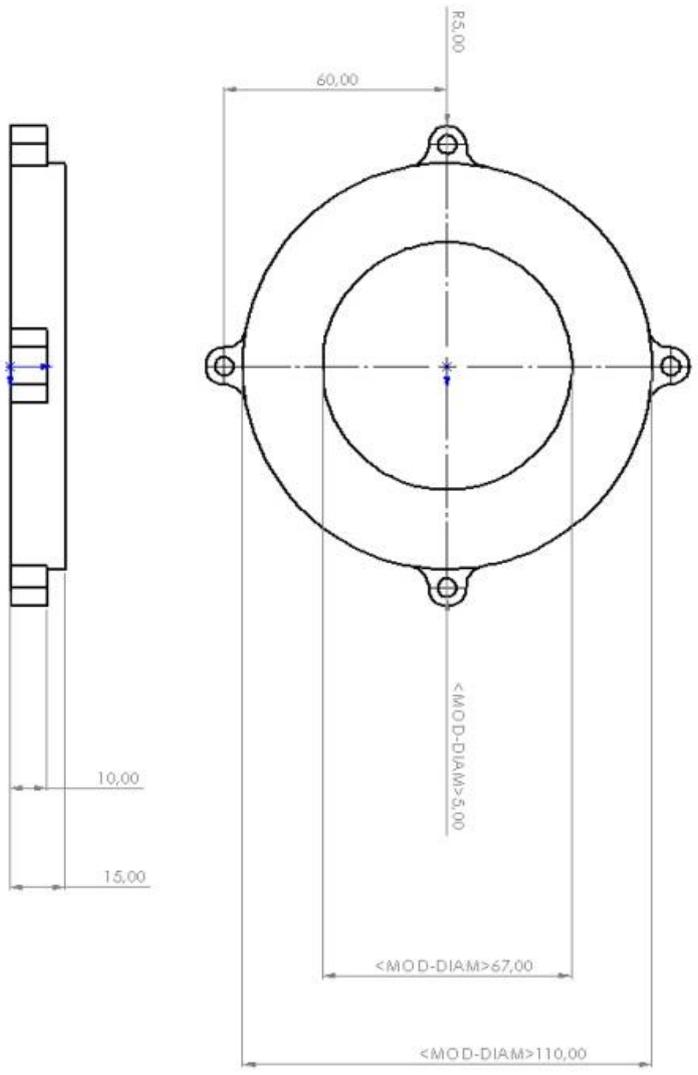
| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | |
| Etudiant | CHALAL | Top part 10 |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| | | Date: 24/09/2021 |



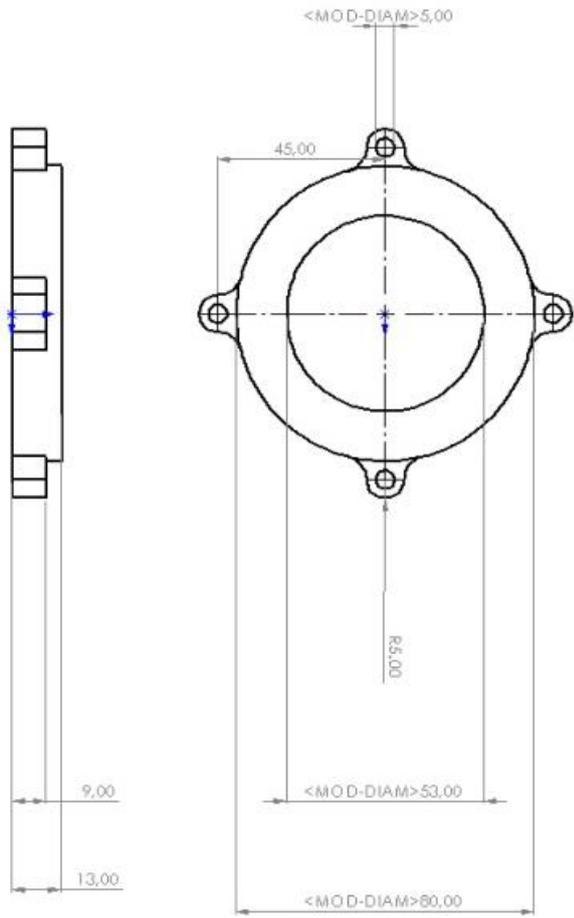
| | | |
|-------------------------------|--------|--------------|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | |
| Evidant | CHAVAL | |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| Top part 25 | | G.MECHANIQUE |
| | | Date: |
| | | 24/09/2021 |



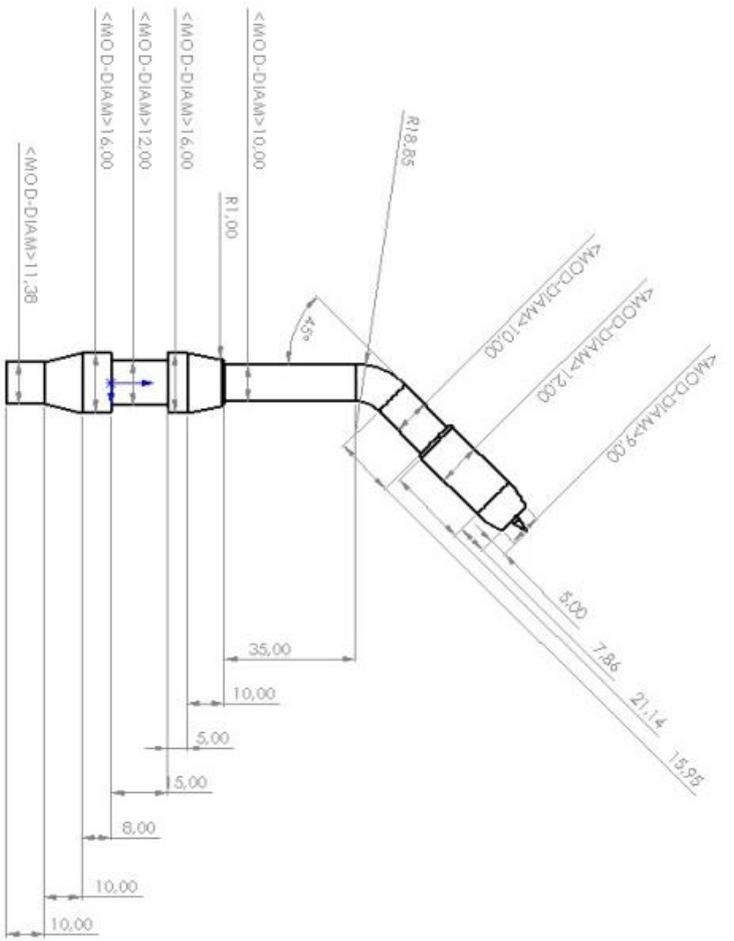
| | | |
|-------------------------------|-------|------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 2:1 | |
| Etudiant CHALAL | | Top Part |
| | | |
| Promoteur | TAZI | Date: |
| Promoteur | BOURI | 24/09/2021 |



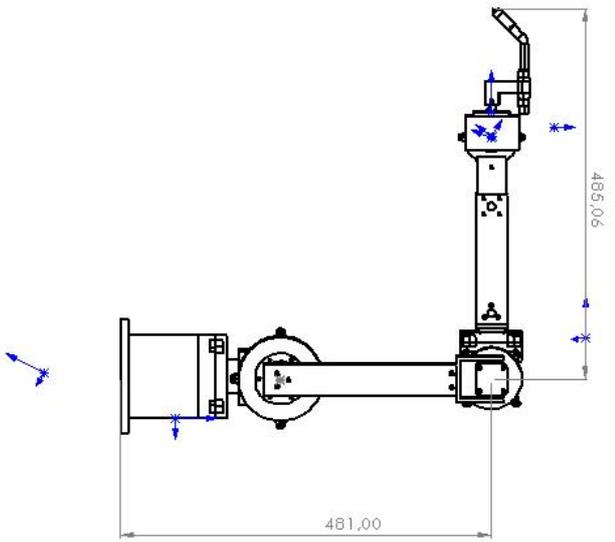
| | | |
|-------------------------------|------------------|------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: 1:1 | | |
| Etudiant: CHALAL | Top Cache | G.MECHANIQUE |
| Promoteur: TAZI | | Date: 24/09/2021 |
| Promoteur: BOURI | | |



| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:1 | |
| Etudiant | CHALAL | Top cache 25 |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| | | Date: |
| | | 24/09/2021 |
| | | G.MECHANIQUE |



| | | |
|-------------------------------|--------|------------------|
| Ecole Nationale Polytechnique | | ENP |
| Echelle: | 1:1 | |
| Etudiant | CHALAL | Torche |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |
| | | Date: 24/09/2021 |



| | | |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE | | ENP |
| Echelle: | 1:5 | G.MECANIQUE |
| Etudiant | CHALAL | Date: 24/09/2021 |
| Promoteur | TAZI | |
| Promoteur | BOURI | |

BRAS