

Clément CHAPUIS, Félix HERAULT et Aurélien SUTRA
Option MSC

Rapport de projet

Réalisation d'un robot d'assistance pour les personnes en situation de handicap

École Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications, Option Mécatronique et Systèmes Complexes

Professeurs encadrants:

Alexis MARTIN

Nicolas PAPAZOGLOU



Année 2022 - 2023

Table des matières

Résumé	1
Introduction	2
I Contexte, objectifs et organisation du Projet	3
1 Contexte du projet	4
2 Cahier des charges	4
3 Réalisation et tenue du Gantt, répartition du travail	4
II Partie technique	6
1 Dimensionnement	7
1 Architecture générale du robot	7
2 Matériaux	9
3 Choix des moteurs	9
2 Modélisation	11
1 Réalisation de la base	11
2 Réalisation de l'épaule	14
3 Réalisation du bras	17
4 Modélisation du reste du bras robotique	18
5 Impression 3D et assemblage	18
6 Réalisation de la pince robotique	22
3 Commande des steppers	25
1 Problématique	25
2 Choix du driver	26
3 Réalisation du PCB	27
4 Essai de commande moteur	35
III Rétrospective et Expérience	37
1 Apprentissage technique, difficultés rencontrées	38
2 Développement personnel	39

Conclusion	40
Bibliographie	41

Résumé

Ce document rend compte de notre avancement et de nos résultats concernant notre projet de troisième année, section Mécatronique et Systèmes Complexes (MSC). Ce projet fait partie intégrante de notre cursus d'ingénieur en tant que module à valider pour obtention du diplôme, mais constitue aussi une expérience de recherche et développement dans le domaine de la robotique ainsi que de travail en groupe.

Ce projet a été réalisé en pleine coopération par les élèves ingénieurs CHAPUIS Clément, HERAULT Félix et SUTRA Aurélien sous la supervision de Messieurs Alexis MARTIN et Nicolas PAPAZOGLOU, actuellement professeurs à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications (ENSEA).

Ce rapport de projet ainsi qu'une soutenance ayant lieu le Mercredi 18 Janvier seront évalués par un jury constitué de ces mêmes professeurs à l'ENSEA.

Introduction

Les premières apparitions des mots robot et robotique se font dans la littérature avec "Les robots universels de Rssum" (K. Capek, 1920) et "Menteur!" (I. Asimov, 1941). Nous trouvons cependant des références à des humanoïdes artificiels dans l'antiquité.

La robotique est une science qui fait intervenir de nombreuses connaissances telles que la conception de systèmes, les mathématiques, la mécanique, l'électronique ou encore l'asservissement. Nous retrouvons les robots dans trois grands domaines d'applications :

- La production grâce à ses nombreux avantages (automatisation, rapidité, flexibilité, apprentissage)
- L'exploration grâce à sa capacité à accéder à des zones inaccessibles par l'homme (incendies, radioactivité, zones minées, spéléologie, fonds marins, spacial ...)
- L'aide individuelle afin d'assister pour des tâches pénibles, ennuyeuses, dangereuses. Il décuple la force (exosquelette), augmente la précision, agit à distance (chirurgie). Ils sont d'une grande aide dans des situations de handicap (prothèses, fauteuil roulant ...)

C'est dans ce dernier domaine que notre travail s'inscrit avec la réalisation d'un robot d'assistance à une personne en situation de handicap. Nous le réalisons en coopération avec une clinique et certains de ses patients.

Ce type de projet est très complexe à cause des contraintes liées à l'utilisateur qui possède un profil particulier dont il faut absolument tenir compte pour que le robot remplisse sa mission dans les meilleures conditions.

Il est par ailleurs à noter que ce projet ne se termine pas avec notre départ. Un tel projet ne peut pas être traité en trois à quatre mois et d'autres étudiants prendront notre relève, notamment un groupe d'étudiants de deuxième année à l'ENSEA travaillant en parallèle sur ce projet, notamment sur l'interface homme-machine ainsi que la commande de certains moteurs.

Ce projet doit, à terme, mener à des essais avec des patients.

Dans ce rapport, nous allons commencer par présenter le contexte dans lequel s'inscrit le projet, nos objectifs ainsi que notre organisation.

Ensuite, nous allons exposer la partie technique du projet, avec ses aspects théoriques ainsi que la modélisation de notre bras robotique et les différentes réalisations que nous sommes parvenus à faire. Enfin, nous allons conclure sur ce projet, ce que nous en retenons et ce qu'il nous a apporté. Vous trouverez une partie bibliographique à la fin du rapport.

Première partie

Contexte, objectifs et organisation du Projet

1 Contexte du projet

Notre projet est initialement l'idée de notre professeur M. PAPAZOGLOU. En effet, celui-ci est entré en contact avec une clinique qui a proposé que l'on puisse réaliser un système permettant d'assister une personne en situation de handicap dans sa vie quotidienne. L'exemple utilisé, qui est finalement devenu notre objectif principal, était celui d'un patient n'ayant pas la possibilité de consommer un yaourt seul mais pouvant manipuler une cuillère. L'idée nous est donc venue de réaliser un robot 6 axes pour aider cette personne avec une préhension réduite.

Notre projet est soumis à des contraintes temporelles : en effet, il devait être réalisé durant notre premier semestre, notre départ en stage après ce dernier ne permettant pas de continuer de travailler sur ce projet. Les élèves de deuxième année ont plus de temps et vont travailler sur ce projet jusqu'au terme de leur deuxième semestre.

L'ensemble du projet est réalisé à l'ENSEA (sans compter le travail personnel que nous nous sommes globalement imposé à la maison) qui possède tout l'équipement dont nous avons besoin, notamment pour créer des PCB ou imprimer des pièces. Les commandes sont passées directement auprès de nos professeurs encadrants.

2 Cahier des charges

Comme nous l'avons expliqué, nous avons pour objectif de réaliser un robot 6 axes anthropomorphe capable d'attraper, de manipuler, sans le détériorer, un pot de yaourt. Il faut qu'il puisse être dirigé pour se placer dans la position idéale vis à vis de l'utilisateur et qu'il puisse garder cette position, et ce malgré les contraintes liées aux mouvements de l'utilisateur et de sa cuillère par rapport au yaourt.

Concernant le contrôle du robot, l'idée serait que l'utilisateur puisse le contrôler aisément avec des boutons ou un joystick, afin de le placer dans la position voulue. Ce type de commande pourrait être reliée directement au fauteuil de l'utilisateur, si celui-ci en possède un disposant d'une connexion Bluetooth. Un autre mode de contrôle serait la mémorisation de position, en plaçant le robot directement dans la position souhaitée. L'utilisateur pourrait enregistrer cette position pour que le robot se replace tout seul dans celle-ci après appui sur un bouton.

Concernant la manipulation du pot de yaourt, le robot doit être équipée d'une pince de préhension dont la configuration permettrait d'attraper le yaourt sans le détériorer et le garder dans la bonne position.

3 Réalisation et tenue du Gantt, répartition du travail

Nous avons séparé le travail en deux groupes :

- le groupe des étudiants de deuxième année, se chargeant de l'interface homme-machine et de la commande des servo-moteurs
- le groupe des étudiants de troisième année (nous), se chargeant de l'architecture complète du robot, de son alimentation et de la commande des steppers.

Dans la suite de ce rapport, nous ne parlerons que de notre travail en tant qu'élèves de l'option MSC.

Pour nous organiser, nous nous sommes appuyés sur un diagramme de Gantt actualisé le plus souvent possible et accessible à tout moment pour les professeurs encadrants. Nous avons pu y décliner l'ensemble des tâches à réaliser ainsi qu'une durée sur laquelle nous devions, idéalement, y travailler. Voici notre diagramme :

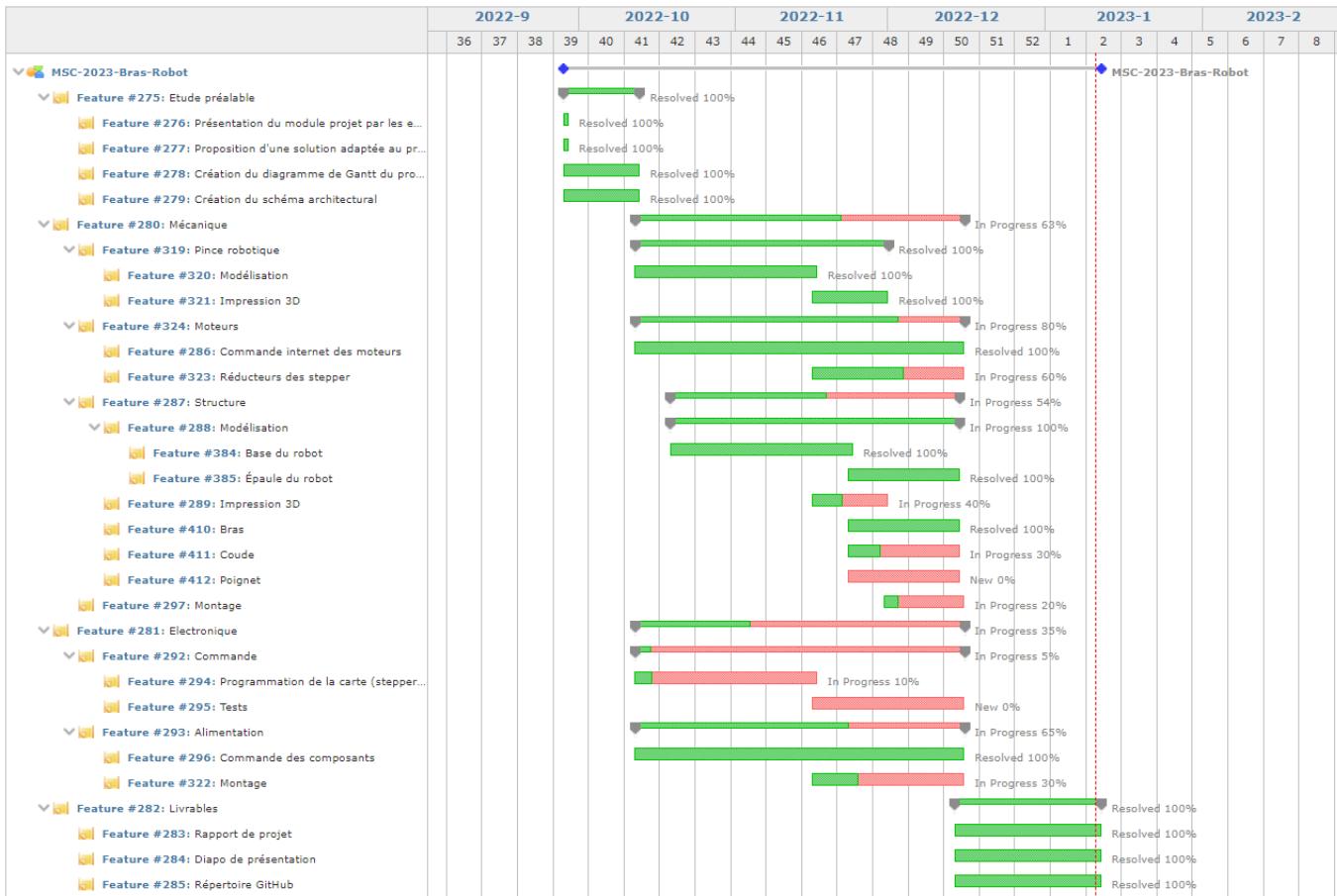


FIGURE 1 – Diagramme de Gantt de notre projet.

Globalement, nous avons distribué le travail comme suit :

- Aurélien SUTRA s'est chargé de la partie alimentation du robot et commande des steppers
- Félix HERAULT s'est chargé d'une partie de l'architecture du robot et plus particulièrement de sa base et des réducteurs des steppers
- Clément CHAPUIS s'est chargé de la réalisation de la pince de préhension ainsi que d'une partie de l'architecture du robot, et plus particulière de la structure manipulée par les moto-réducteurs

Deuxième partie

Partie technique

Chapitre 1

Dimensionnement

1 Architecture générale du robot

Notre robot repose beaucoup sur le robot Niryo Ned, dans le sens où il a été un modèle pour nous au niveau des dimensions et des moteurs à choisir.

Le robot se constitue de 7 parties, qui représentent les parties d'un bras humain. Entre chaque partie nous avons placé une liaison pivot actionnée grâce à un moteur. Les différentes parties sont : la base, l'épaule, le bras, le coude, l'avant-bras, le poignet, la main. Sur la main, nous avons ensuite placé une pince de préhension qui servira à attraper les objets désirés.



FIGURE 1.1 – Les différentes parties d'un robot 6 axes et leur dénomination.

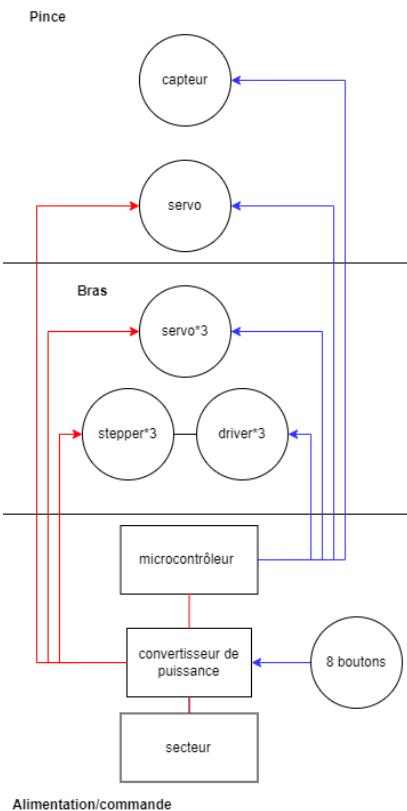


FIGURE 1.2 – Architecture générale de notre robot.

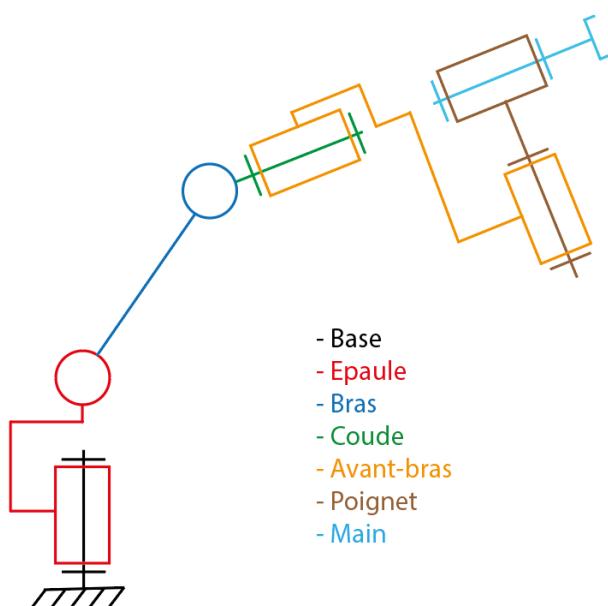


FIGURE 1.3 – Diagramme des liaisons de notre robot.

2 Matériaux

La grande majorité des éléments du robot a été imprimée en 3D avec du PLA. Nous avons également des roulements à bille pour diminuer les frottements au niveau des liaisons pivots. Des vis sont également présentes pour le maintien de 2 pièces entre elles.

Pour le bras et l'avant-bras, nous utilisons un tube en plexiglas qui permet de faire la longueur de la pièce avec une bonne résistance, et qui permet moins d'impression 3D.

3 Choix des moteurs

Nous avons vu auparavant que nous avions besoin de 6 moteurs différents, pour les 6 axes, ainsi que d'un autre moteur pour la pince. Pour les liaisons Base/Epaule/Bras et Bras/Coude nous utilisons des steppers, et pour les autres, nous utilisons des servomoteurs.

Le choix des steppers a été rapide, car pour ne pas trop dépenser nous avons utilisé des steppers déjà présents à l'école, les PM55L-048-HPD5. Ensuite, pour les différents servomoteurs, nous nous sommes inspiré de ceux présents sur le robot Niryo, et nous avons choisi :

- pour les liaisons Coude/Avant-Bras et Avant-bras/Poignet les servomoteurs AX-12
- pour la liaison Poignet/Main et la pince les servomoteurs Dynamixel XL-320

Évidemment, pour valider entièrement ces choix nous avons vérifié si leur caractéristiques fonctionneraient bien vis à vis de nos attentes.

Pour cela nous avons fait une estimation rapide du couple qui serait effectué au niveau des pivots pour lesquels le couple est très important : les liaisons Epaule/Bras et Bras/Coude. Nous calculons ensuite le couple appliqué sur ces liaisons via le poids des moteurs et la force appliquée par l'utilisateur au bout du moteur. Nous nous plaçons dans la position où les efforts sont les plus importants, c'est-à-dire lorsque le bras est en position horizontale.

Pour faire cela, nous avons imaginé un schéma simple du robot :

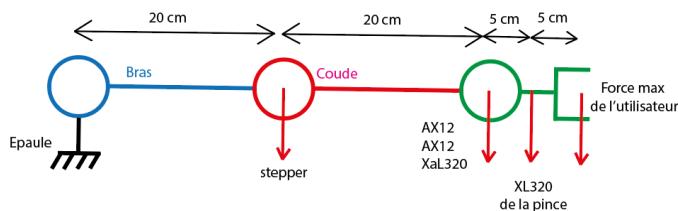


FIGURE 1.4 – Vision schématique de notre robot pour le calcul du couple.

Ce schéma présente les positions des poids des moteurs et de la force appliquée par l'utilisateur, avec une position exagérée car nous négligeons tout d'abord le poids des autres pièces composant le bras. Cela nous permet tout de même d'avoir un aperçu du couple nécessaire en sortie des moteurs pour les liaisons Epaule/Bras et Bras/Coude.

Pour respecter notre cahier des charges, les masses des moteurs sont :

$$\text{PM55L-048-HPD5 } m(pm) = 221\text{g} ; \text{ AX-12 } m(ax) = 54.6\text{g} ; \text{ Dynamixel XL-320 } m(xl) = 17\text{g}$$

Pour le premier couple nous avons :

$$C_1 = g(0.2 \times m(pm) + 0.4(2 \times m(a_x) + m(x_1)) + 0.45 \times m(x_1) + 0.5 \times m_{utilisateur})) = 5.9 N.m$$

Pour le deuxième couple nous avons :

$$C_2 = g(0.2(2 \times m(a_x) + m(x_1)) + 0.25 \times m(x_1) + 0.3 \times m_{utilisateur})) = 3.2 N.m$$

Selon la documentation, les steppers ont un couple d'environ 1 N.m. Ainsi, pour être en mesure d'avoir assez de couple, Nous allons utiliser des réducteurs. Les réducteurs vont être fait en impression 3D et nous voudrions avoir un rapport de réduction au moins deux fois supérieur à la valeur calculée. Cela nous donne une bonne marge, nécessaire, vu les approximations faites qui négligeaient plusieurs parties telles que le poids des pièces imprimées en 3D, que nous n'avions pas réalisées, mais également en négligeant le rendement des moyens de transmissions. Les valeurs retenues sont alors de 15 N.m pour la transmission Epaule/Bras et de 9 N.m pour la transmission Bras/Coude.

Chapitre 2

Modélisation

1 Réalisation de la base

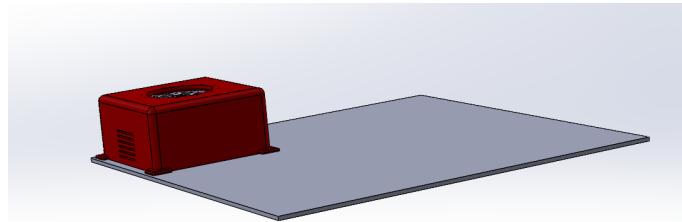


FIGURE 2.1 – Vision large de la base du robot.

Pour réaliser la base, nous avons tout d'abord besoin de connaître les dimensions des composants qui vont être placés à l'intérieur.

Les différents composants à placer à l'intérieur sont :

- Le transformateur
- le moteur (stepper, PM55L-048-HPD5)
- la carte de commande
- les différents câbles à faire passer à l'intérieur.

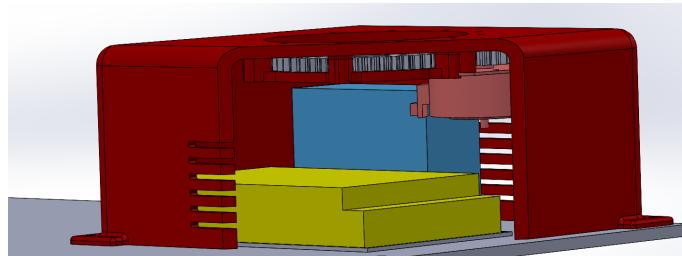


FIGURE 2.2 – Vue en coupe de la base du robot.

La base est fixée sur un plateau de taille assez grande, qui servira d'espace d'utilisation du robot. Cela permet également d'empêcher toute chute du bras. Ce plateau pourra être réalisé via une planche de bois.

Pour réaliser la rotation entre la Base et l'épaule nous utilisons un engrenage imprimé en 3D avec un rapport de transmission de 4. Ce rapport de transmission est suffisant car les efforts de couple

ne sont pas très importants pour cette rotation. Les deux roues dentées ont été réalisées avec un module de 2, pour ne pas avoir des tailles de dent trop petites qui pourraient soit casser, soit être mal imprimées. La plus petite des roues dentées est encastrée sur l'axe de sortie du moteur.

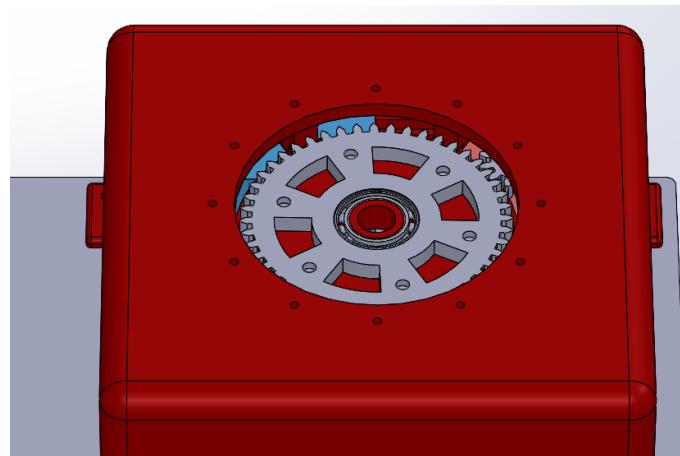


FIGURE 2.3 – Vue du dessus de la base du robot (avec la roue dentée bien visible).

Nous observons ici que, pour effectuer la liaison pivot, l'intérieur de la roue dentée est encastré dans un roulement à bille qui est lui-même encastré dans le bâti. L'axe du bâti est traversé par un trou pour permettre aux différents câbles de passer.

Les différents problèmes rencontrés :

- 1) Une première version de la base a été faite en un seul bloc, mais pour faciliter l'impression, nous avons dû séparer la base en 2 blocs. On peut voir la deuxième partie de la base, qui sert de support à la roue dentée.

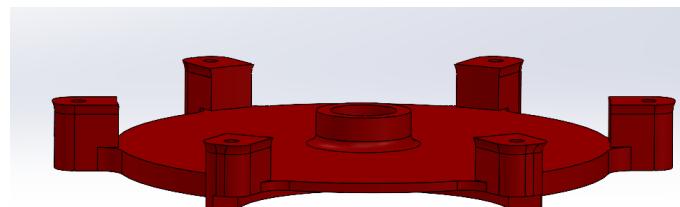


FIGURE 2.4 – Support de la roue dentée.

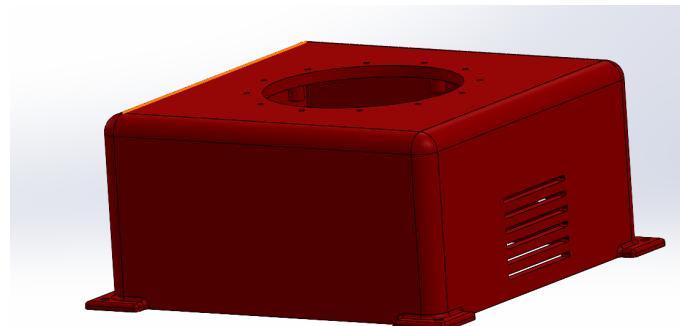


FIGURE 2.5 – Carcasse de la base.

2) Le modèle SolidWorks utilisé pour le moteur avait une mesure plus élevée de l'écart de ses 2 trous de fixations que le moteur réel. Cela nous a donc empêché de fixer correctement le moteur à la base. Pour résoudre ce problème, nous avons alors utilisé des écrous et nous avons percé des trous aux bons endroits pour réussir à fixer le moteur.

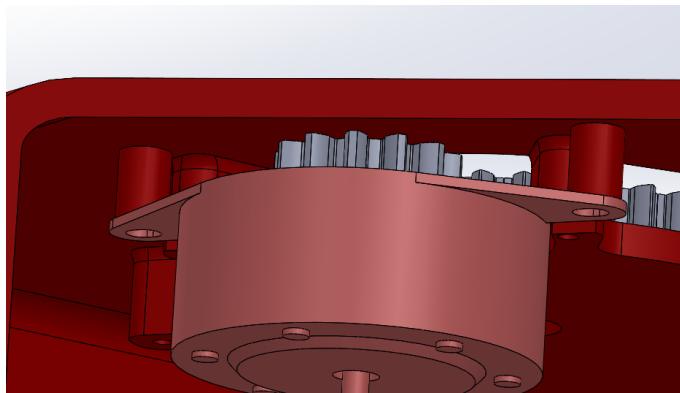


FIGURE 2.6 – Montage du stepper dans la base.

Sur cette photon nous observons les vis/écrous utilisés pour maintenir les pièces de la base ensemble, ainsi que les deux vis/écrous utilisés pour maintenir le moteur.

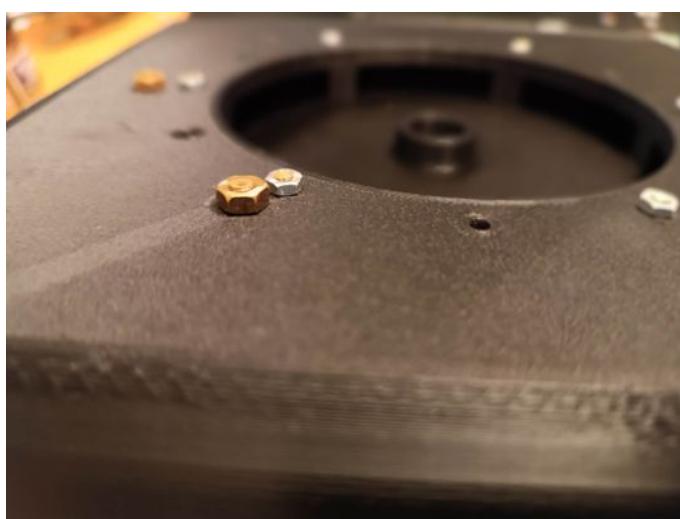


FIGURE 2.7 – Visserie de la base.

2 Réalisation de l'épaule

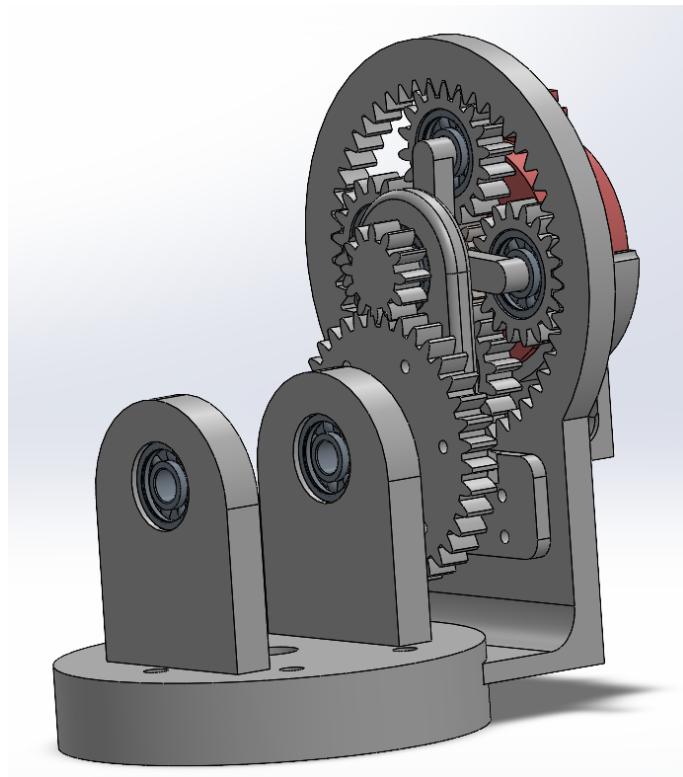


FIGURE 2.8 – Vue large de l'épaule avec son réducteur en train épicycloïdal.

Cette pièce est premièrement fixée à la roue dentée située sur la base qui tourne constituée d'une roue dentée (qui tourne grâce au moteur de la base), sur laquelle nous venons fixer le support de rotation.

Pour réaliser la transmission, plusieurs tentatives ont été faites pour pouvoir respecter le rapport de réduction minimum de 12. Tout d'abord, les roues dentées utilisées avec un module de 1.75, cette valeur a été choisie avec l'accord des professeurs, car nous ne voulions pas avoir des dents trop fines, pour des raisons de solidité mais aussi de précision d'impression. Nous avons d'abord essayé en alignant des roues dentées. Le problème est que le moteur se retrouve beaucoup excentré de l'axe de rotation et cela apporte des contraintes mécaniques supplémentaires. De plus, il faudrait utiliser de grande pièces à imprimer en 3D pour assurer la fixation du moteur et de placer des axes pour les roues.

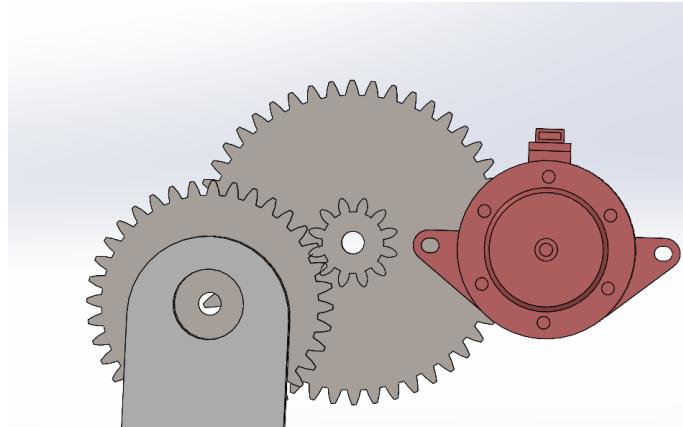


FIGURE 2.9 – Système d’engrenage simple.

Ainsi nous avons opté pour un autre moyen de transmission, qui va nous permettre d’avoir un grand rapport de réduction avec une place utilisée moindre : un train épicycloïdal.

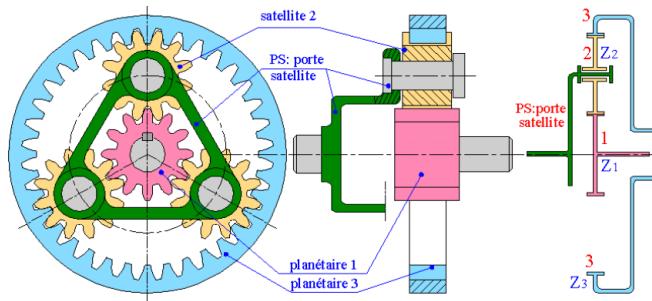


FIGURE 2.10 – Vue en coupe d’un train épicycloïdal.

Cela va nous permettre d’avoir un grand rapport de réduction avec une place utilisée moindre. Plusieurs façons d’utiliser le train sont possibles. Dans notre cas, nous allons utiliser le mode où le planétaire extérieur est bloqué (couronne). Nous aurons pour axe d’entrée le planétaire 1 avec un couple C1, et pour sortie le porte satellite avec un couple Cps. Cela va en effet permettre d’avoir un rapport de réduction plus élevé qu’avec les autres modes. Pour calculer son rendement on utilise la formule de Willis

$$\frac{n_1 - n_{ps}}{n_2 - n_{ps}} = (-1)^y \times \frac{z_3}{z_1} = \frac{\omega_1 - \omega_{ps}}{\omega_2 - \omega_{ps}}$$

avec n1 la rotation en rpm du planétaire 1 ; n2 la rotation en rpm des satellites ; nps la rotation en rpm du porte satellite ; et n3 la rotation en rpm du planétaire 3 (couronne) et y le nombre de contacts extérieurs dans les engrenages (dans notre cas, il vaut 1)

Avec la couronne bloqué on a $n_3 = 0 = \omega_3$, on a alors :

$$\frac{n_1 - n_{ps}}{0 - n_{ps}} = (-1)^1 \times \frac{z_3}{z_1}$$

$$1 - \frac{n_1}{n_{ps}} = -\frac{z_3}{z_1}$$

$$\frac{n_1}{n_p s} = \frac{z_3}{z_1} + 1 = \frac{z_3 + z_1}{z_1}$$

Nous obtenons alors le résultat suivant :

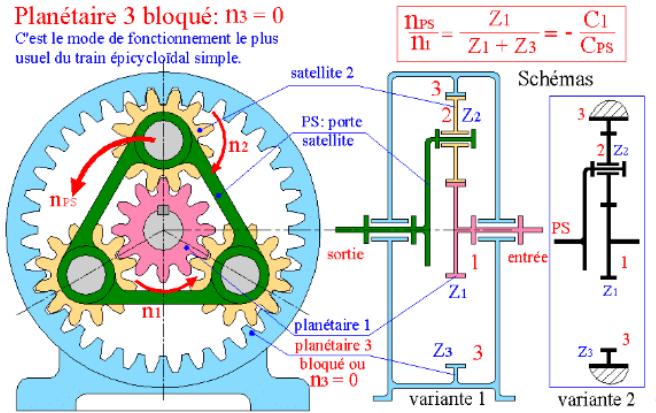


FIGURE 2.11 – Suite des calculs.

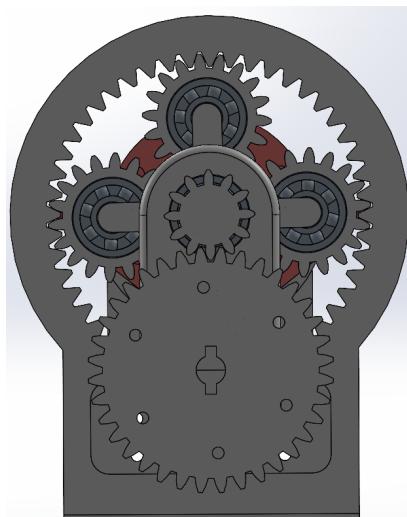


FIGURE 2.12 – Le train épicycloïdal du projet.

Pour pouvoir faire rentrer le planétaire autour du pignon sur l'axe de sortie du moteur nous avons pris un pignon de 12 dents pour le planétaire 1. Voulant un couple de sortie assez élevée, nous avons décidé de prendre la couronne avec 48 dents, ce qui donne au final un rapport de réduction de :

$$\frac{Z_1}{Z_3 + Z_1} = \frac{12}{12 + 48} = 5$$

le couple de 15 N.m, nous allons rajouter une roue dentée. Pour ce faire on attache au porte satellite un pignon à 12 dents qui va entraîner une roue dentée de 36 dents qui sera attachée au bras.

Pour la réalisation de l'épaule, nous avons également réalisé la structure mise en mouvement par les motoréducteurs. Rattachée à l'axe et à la roue dentée à la fin du réducteur, elle doit pouvoir supporter le mouvement du robot ainsi que les autres articulations se trouvant sur la suite du bras robotique. Nous avons donc modélisé cette structure comme suit :

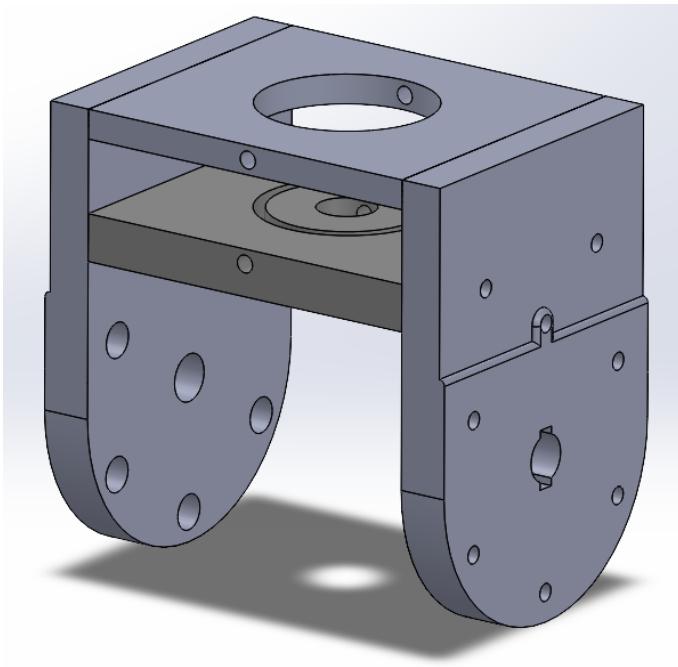


FIGURE 2.13 – Structure de l'épaule mise en mouvement.

L'axe de l'épaule y est imbriqué, permettant ainsi de créer une liaison pivot et une mobilité supplémentaire par rapport à la base.

3 Réalisation du bras

Afin de réaliser la partie "bras" du robot, nous imbriquons dans la structure de l'épaule un cylindre creux dont le but est d'être connecté au coude. Nous nous inspirons ainsi du robot de *Niryo* qui possède lui aussi une cylindrerie à cette endroit.

Après discussion avec le technicien de l'atelier de mécanique de l'école, nous avons opté pour un cylindre creux de 20 cm de longueur, 26 cm de diamètre intérieur et 30 cm de diamètre extérieur. La matière utilisée est le plexiglas, pour sa légèreté ($1.18g/cm^3$ pour sa masse volumique contre $2.47g/cm^3$ pour de l'aluminium), sa robustesse comparativement à du PLA et sa facilité à être coupé ou percé.



FIGURE 2.14 – Structure mobile de l'épaule avec l'axe du bras imbriqué.

4 Modélisation du reste du bras robotique

Nous n'avons pour le moment pas eu le temps de réaliser le reste du robot. Une partie est modélisé et disponible en version simulation sur SolidWorks, à savoir le coude, avec sa structure et le réducteurs adéquat, et une autre partie, l'avant-bras, est constitué par un autre cylindre en plexiglas que nous avons découpé et qui doit être imbriqué dans le coude. Il s'agit du même cylindre que pour le bras, à ceci près que celui-ci fait 17 cm de longueur.

Une autre partie n'a pas encore pu être modélisée, à savoir le poignet du robot.

5 Impression 3D et assemblage

La majorité des pièces modélisées ont été imprimées en 3D, soit par les professeurs encadrants pour la majorité, soit par Félix. Les pièces imprimées par les professeurs ont été faites avec l'imprimante Creality Ender 3 pro, et les pièces imprimées par Félix avec l'imprimante Creality Ender 3. Pour pouvoir imprimer en 3D nous avons besoin d'enregistrer la pièce solidWorks en .STL, qui va pouvoir être lu par le logiciel de slicing, pour les pièces imprimer nous même nous avons utilisé le logiciel Creality Slicer. Ce logiciel permet de placer avec la bonne orientation la pièce sur le plateau d'impression de l'imprimante. Il permet également de gérer le remplissage des pièces, le choix de support ou non, et également le choix du maintien sur le plateau d'impression.

Base :



FIGURE 2.15 – Vue par dessous de la base.

Les deux parties du bloc de la base ont été fixées entre elles grâce à 6 vis et écrous de taille M3. Le moteur a lui été fixé sur la base via deux longues vis et plusieurs écrous pour pouvoir le positionner à bonne distance pour que la roue dentée située sur l'axe de sortie du moteur entraîne bien l'autre

roue. Cette roue dentée a été mise sur l'axe en chauffant légèrement le plastique et l'axe du moteur pour venir encastre la roue dentée autour du pignon de sortie du moteur. Pour cela nous avons pris un diamètre interne interne de la roue dentée inférieur à celui du pignon pour que le plastique se moule autour du pignon.

Nous avons ensuite imprimé la roue dentée qui va se faire entraîner par engrenage, à l'intérieur de laquelle nous plaçons un roulement à bille (nom) avec un diamètre interne de 1420mm et de diamètre externe 32mm. Pour que cette roue puisse s'attacher à l'épaule, nous plaçons 6 écrous que nous enfonçons en les chauffant au fer à souder.

Après assemblage nous observons de légers frottements lorsque l'on fait tourner les roues. Cela est dû à la grande roue qui frotte au niveau de la pièce sur laquelle elle repose, cela malgré le congé effectué sur le tube dans lequel le roulement s'encastre, car lorsque l'on applique une force (simulant le poids final du bras) la roue dentée s'enfonce plus que prévu dans le roulement. Pour éviter cela, on aurait pu faire un congé plus grand et faire une roue plus large au niveau de son axe et y ajouter une butée pour que la pièce ne descende pas plus bas que le roulement.

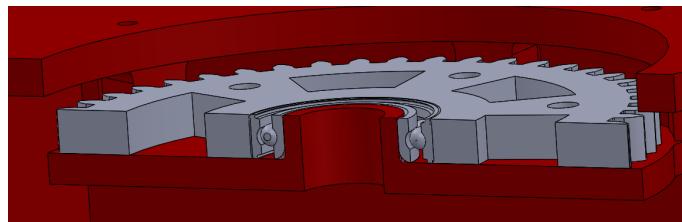


FIGURE 2.16 – Vue en coupe de la roue dentée.

À droite, on observe le congé à la base de l'axe.

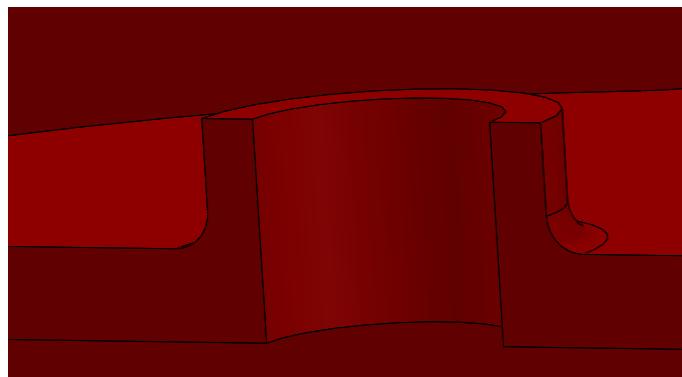


FIGURE 2.17 – Vue du congé.

Épaule :



FIGURE 2.18 – Vue isométrique du train épicycloïdal.

Pour cet assemblage de pièces, nous avons beaucoup plus de pièces, et la précision des différentes roues dentées du train épicycloïdale doit être encore plus précise. Ainsi, pour faire encastrer les roulements dans les roues satellite du train, ainsi que pour encastrer la roue du planétaire 1 dans le pignon du moteur, la technique fut différente. En effet, lorsque l'on a essayé (à plusieurs reprises) de chauffer la roue à insérer dans le pignon du moteur, la chaleur déformait trop les dents de la roue, ce qui la rendait inutilisable dans le train épicycloïdal. Pour remédier à cela, nous sommes allés voir le mécanicien qui, en limant l'intérieur des roues et en forçant, a pu faire rentrer les roues des satellites dans les roulements et la roue du planétaire 1 dans le pignon du moteur. Cette roue est bien insérée dans le pignon de sorte qu'il n'y ait pas de jeu et que la roue ne tourne pas indépendamment du pignon.

Une fois assemblé, le train épicycloïdale présente quelques résistances lorsqu'il tourne. On observe alors qu'à certains endroits des satellites sont poussés vers le planétaire 3, ce qui entraîne plus de frottements et moins de jeu entre les dents. Pour réduire ces frottements nous avons enlevé 2 satellites, en gardant deux se faisant face. Nous constatons alors une amélioration de la rotation, malgré quelques frottements ponctuels. Ces frottements ont pu être enlevés en coupant légèrement, au cutter, le bout des dents qui gênait sur les satellites.

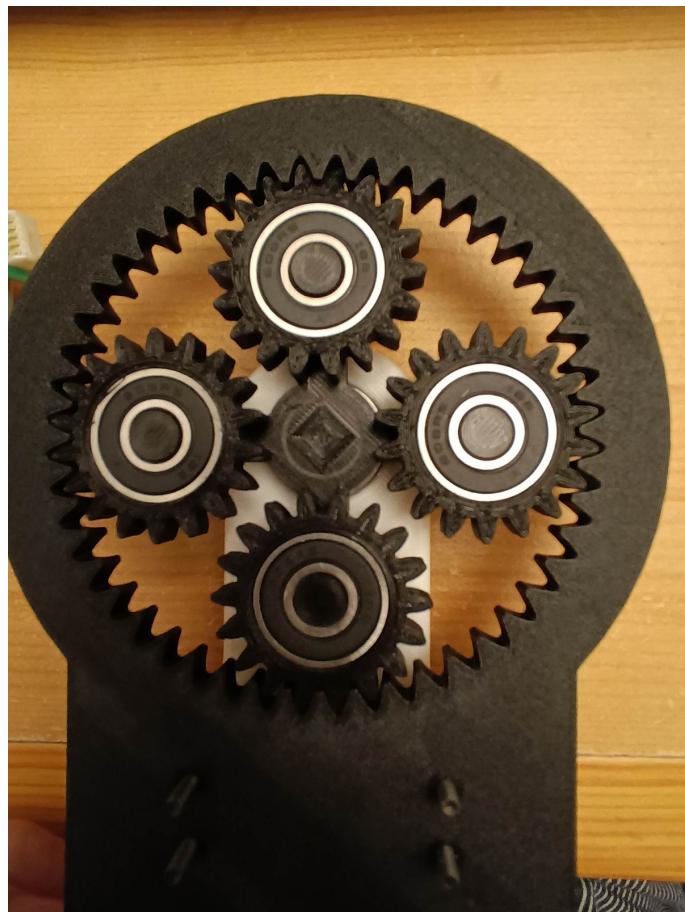


FIGURE 2.19 – Vue permettant de mieux voir la disposition des satellites.

L’assemblage du porte satellite avec la roue dentée de sortie du train épicycloïdale a été modélisé avec un trou pour fixer les deux pièces avec une vis, mais lors de l’assemblage, les deux pièces s’encastrent bien, et leur translation n’est pas facile. Ainsi, pour la pièce ne subissant pas d’efforts radiaux, nous avons décidé de ne pas y mettre la vis.

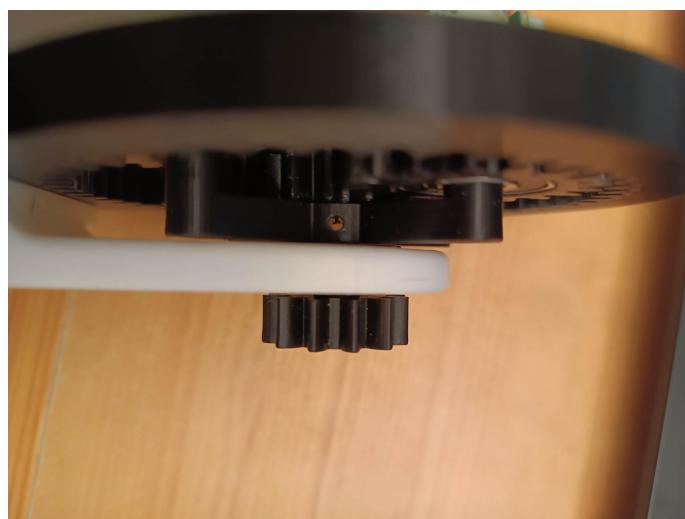


FIGURE 2.20

Le support moteur est fixé au moteur avec deux vis dont la tête est très fine afin de ne pas avoir

de frottements avec les autres pièces. Ce même support est fixé au planétaire 3 et le support de l'axe du support de planétaire via 4 vis M3. Après montage, nous observons qu'un léger jeu est possible au niveau des 2 supports. Pour améliorer cela il faudrait que les supports aient 2 points d'attache différents, en haut du planétaire 3 par exemple.

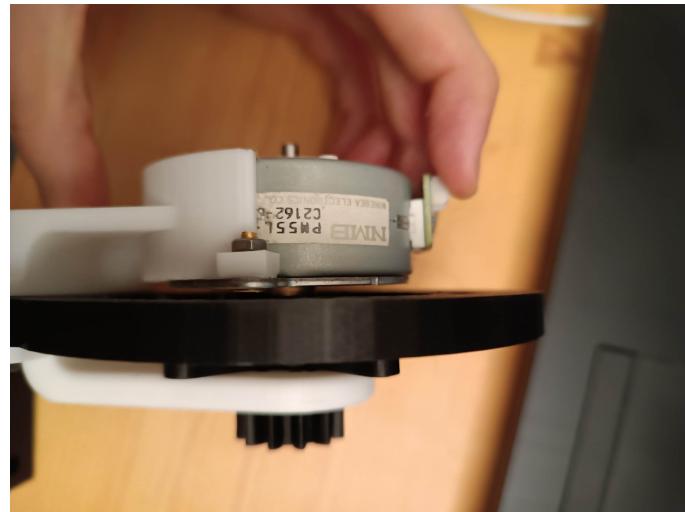


FIGURE 2.21

6 Réalisation de la pince robotique

Pour réaliser notre pince robotique de préhension, nous avons commencé par réaliser une étude de marché. Il existe en effet de nombreux types de pince, utilisant deux, trois voire quatre doigt, montées parallèles ou centrées et ayant des fonctions totalement différentes. Il existe par exemple des pinces à vide, des pinces pneumatiques, des pinces hydrauliques, électriques et même magnétiques. Ces différentes pinces et leurs atouts sont listées dans le tableau ci-contre :

Type de pince	Caractéristiques
Pince à vide	Puissante, abordable mais sensible à la poussière et pas pour tous les types d'objets
Pince pneumatique	Abordable, temps de réponse faible et peu d'encombrement mais peu efficace pour les objets à faible volume
Pince hydraulique	Très grande puissance mais complexe, maintenance élevée et ne convient pas pour des objets fragiles
Pince électrique	Faciles à contrôler mais moins de force que les autres types de pince. Peu avoir du mal avec les objets mous
Pince magnétique	Uniquement efficace pour manipuler des matériaux ferromagnétiques

FIGURE 2.22 – Tableau récapitulatif des types de pince.

Dans notre cas, nous avons assez logiquement choisi de réaliser une pince électrique pour toutes les qualités qu'elle possède et qui nous intéressent.

Par ailleurs, il convient de réaliser une pince robotique parallèle : en effet, l'objet que le robot doit être capable de manipuler est un pot de yaourt, généralement de forme cylindrique. Une pince centrée est plus intéressante pour des objets ponctuels, petits ou ronds.

Nous avons commencé par modéliser une première version de la pince sous SolidWorks. Très simple, cette pince possède deux doigts dont l'un d'entre eux est entraîné par un servomoteur XL-320 de la marque Dynamixel, et l'autre entraîné par le premier par un système d'engrenage basique. Voici ce que donne cette première pince :

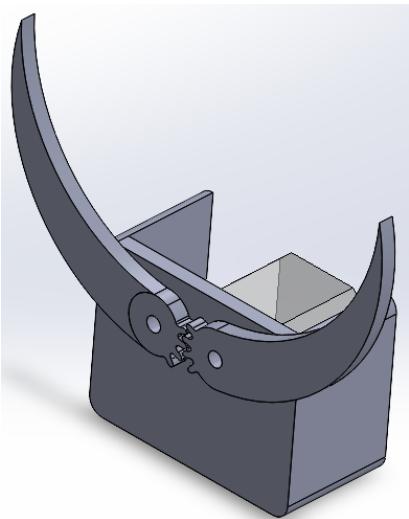


FIGURE 2.23 – Première version de la pince.

Après discussion avec notre professeur M. PAPAZOGLOU, un choix plus judicieux était de réaliser une pince parallèle à trois doigts afin de mieux tenir le yaourt. Nous avons donc réalisé une nouvelle version de la pince en se basant sur l'architecture générale de la première, mais en remplaçant les nouvelles conditions imposées :

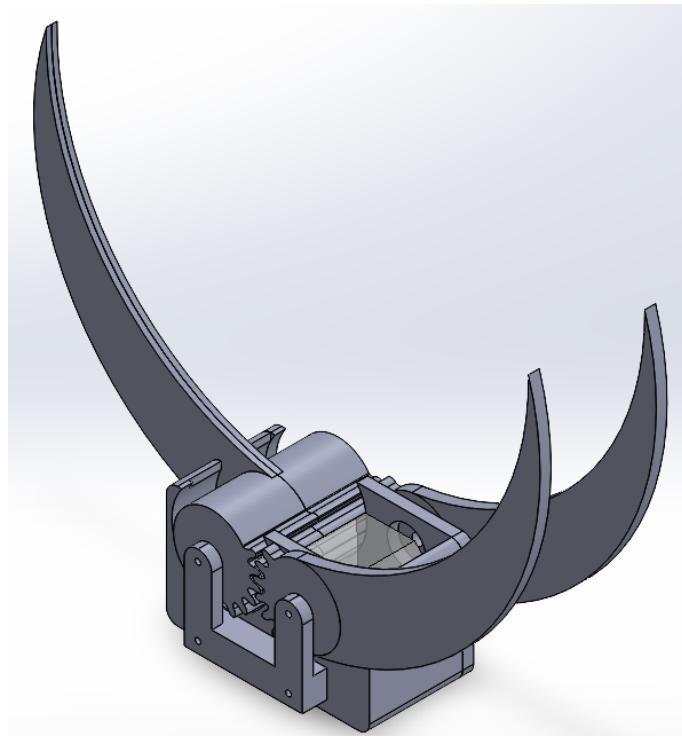


FIGURE 2.24 – Version améliorée de la pince.

Finalement, après quelques améliorations, voici le dernier modèle de pince (version améliorée du deuxième) que nous avons réalisé :

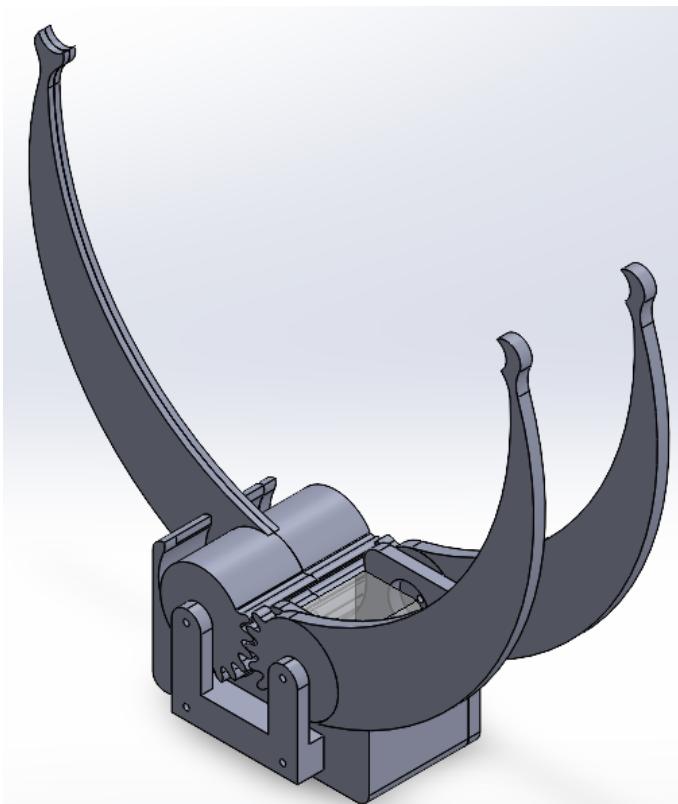


FIGURE 2.25 – Version finale de la pince.

Les différents éléments de cette pince ont été imprimés et montés. Elle est donc prête à être commandée et testée par les étudiants de deuxième année.

Chapitre 3

Commande des steppers

1 Problématique

L'objectif de cette partie est de faire tourner les steppers avec la meilleure précision possible. Pour cela, il faut envoyer la bonne tension au bon moment sur chaque phase du moteur comme indiqué ci-dessous (commande d'un stepper à 4 phases) :

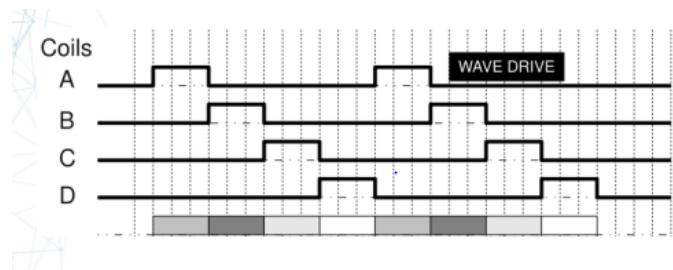


FIGURE 3.1

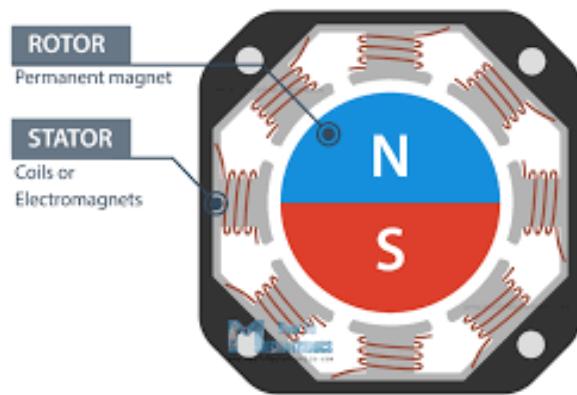


FIGURE 3.2

Chaque phase alimente deux bobines situées de part et d'autre du rotor. Le sens de chaque bobine est le même et par conséquent, lorsqu'une phase est alimentée, le rotor est exposé au côté nord du champ magnétique créé par la bobine au côté sud de l'autre ce qui permet d'orienter le rotor comme désiré.

Étant donné qu'un des objectifs de cette partie est d'être le plus précis possible, nous allons avoir recours au microstepping. Cela consiste à alimenter deux bobines en même temps avec une tension

variable au lieu de les alimenter les unes après les autres pour que le rotor puisse s'orienter dans une direction intermédiaire entre les deux bobines. Ci-dessous la commande permettant de faire cela :

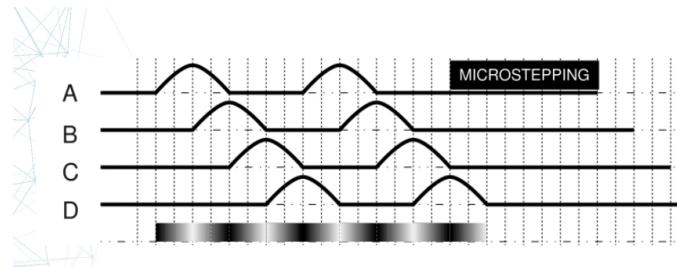


FIGURE 3.3

Notre problème est maintenant de réussir à générer cette commande et le faire à la main sera beaucoup plus long qu'en utilisant un driver de stepper permettant de générer de tels signaux.

2 Choix du driver

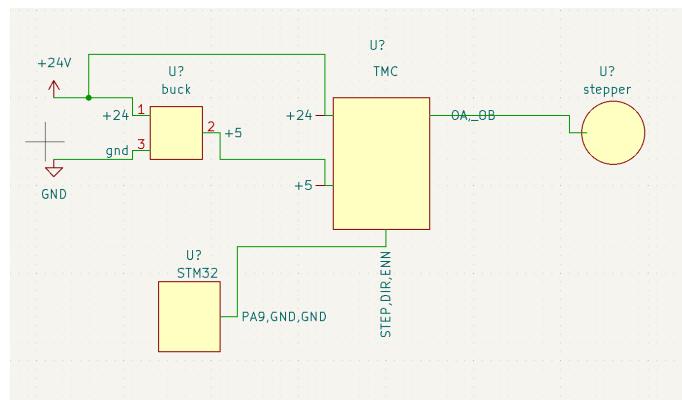


FIGURE 3.4

Le driver devait respecter deux critères. D'abord pouvoir faire tourner le moteur PM55L-048 en l'alimentant en 24V, mais aussi être disponible en boutique. Le choix s'est porté sur le TMC2225 car il peut piloter des steppers allant de 6V à 36V. Il propose aussi plusieurs valeurs de microstepping étant 1/4, 1/8, 1/16 et 1/32. Ces valeurs de microstepping signifient que, pour 1/32 par exemple, il y aura 32 orientations intermédiaires possibles entre deux bobines. Ainsi, si la datasheet dit qu'il y a 48 steps possibles avec le moteur, alors avec un microstepping de 1/32 il y aura 48×32 microsteps par tour de moteur. D'après la datasheet du driver, il faudra 2 entrées d'alimentation (une de 5 et une de 24) et 3 entrées de commande (pour l'usage que nous voulons en faire). Par conséquent, nous allons ajouter un buck pour convertir les 24V fournis par l'alimentation en 5V et piloter les entrées logiques du driver avec une carte STM32. L'assemblage des différents composants sera le suivant :

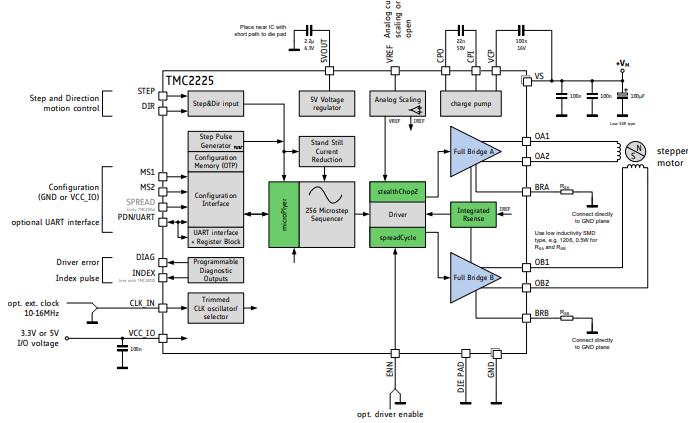


Figure 1.1 TMC2225 basic application block diagram

FIGURE 3.5

3 Réalisation du PCB

Tout le PCB a été modélisé sur Kicad et son schéma électrique (la partie power input représente la tension d'alimentation du PCB) est le suivant :

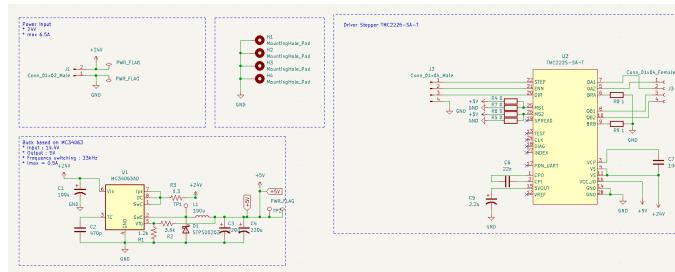


FIGURE 3.6 – PCB modélisé sur Kicad.

Ce circuit est principalement constitué d'un buck et du TMC2225, le buck permet de convertir la tension d'entrée du PCB 24V en une tension de 5V qui sera ensuite envoyée sur la pin VCC_I du driver. Ce dernier n'était pas disponible dans les librairies de Kicad mais il est possible de créer le composant en utilisant l'option de création de symboles.

Pour cela, en ouvrant l'éditeur de symbole, il faut créer une nouvelle bibliothèque pour ensuite pouvoir y ajouter le nouveau composant.

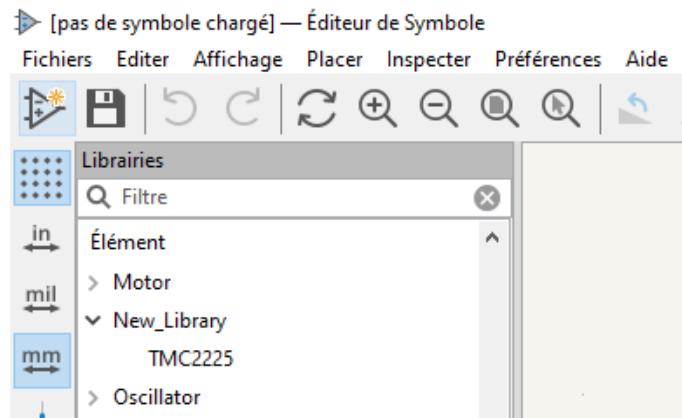


FIGURE 3.7

Une fois la bibliothèque créée, le composant peut être créé à son tour. Après lui avoir donné un nom, une fenêtre permettant de dessiner le composant s'ouvre :

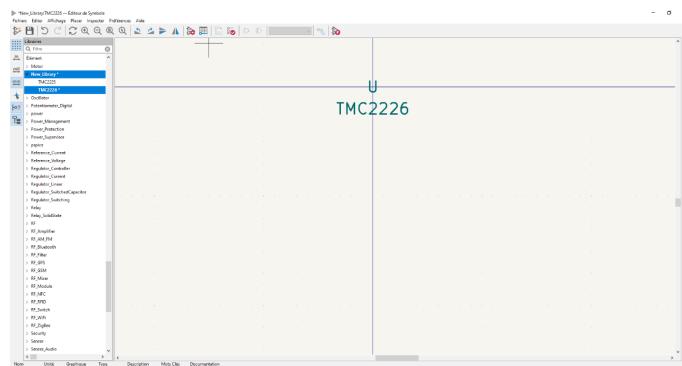


FIGURE 3.8

Avec les outils de dessin sur la droite, il est possible de tracer des formes, ajouter des pins et du texte. Dans le cas du TMC2225, il faut commencer par tracer un rectangle d'une taille suffisamment grande pour qu'il puisse y accueillir toutes les pins du TMC2225. Mettre un remplissage avec couleur d'arrière plan permet d'ajouter de la lisibilité.

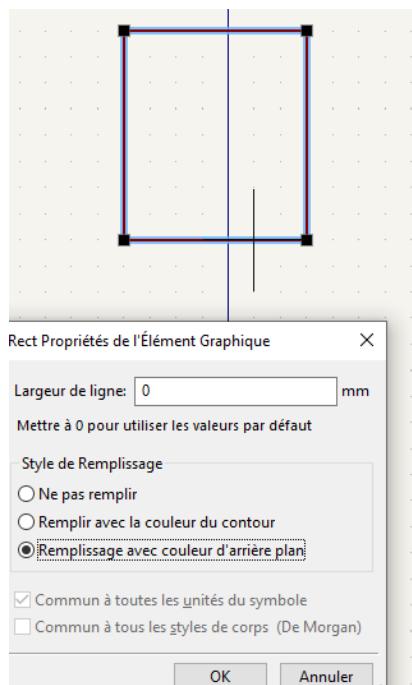


FIGURE 3.9

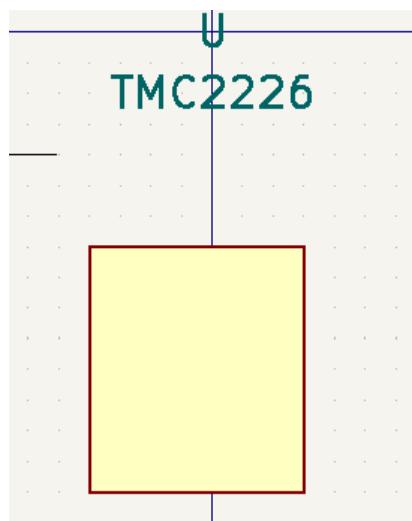


FIGURE 3.10

Puis les pins peuvent y être ajoutées et configurées en entrées ou non connectées selon les besoins.

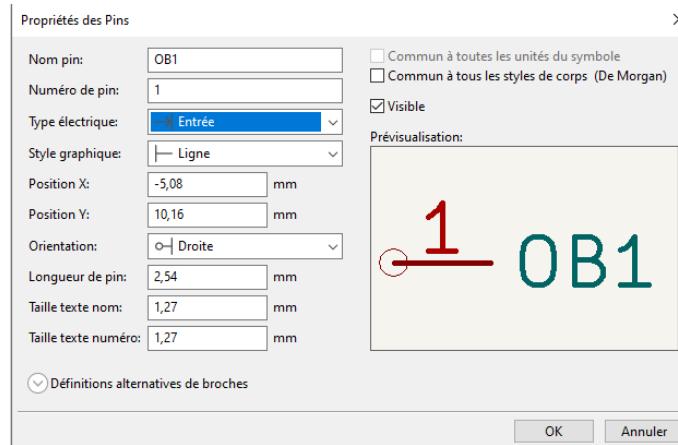


FIGURE 3.11

Enfin, après avoir ajouté toutes les pins, le composant est prêt à être ajouté au schéma

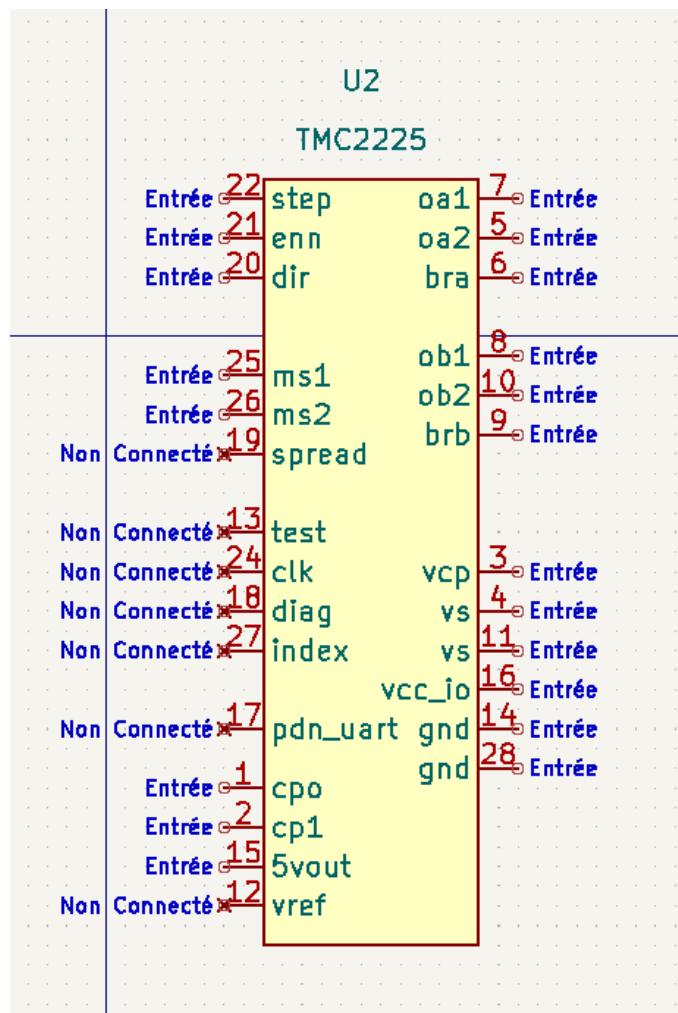


FIGURE 3.12 – Notre composant.

Maintenant le schéma électrique terminé, il faut créer la carte telle qu'elle sera imprimée. Mais il est nécessaire commencer par créer l'empreinte du TMC2225 qui n'est pas incluse dans Kicad. Pour cela, il faut ouvrir l'éditeur d'empruntes et créer une nouvelle bibliothèque puis une nouvelle emprunte de la même manière qu'avec l'éditeur de symbole précédemment. Regarder les dimensions du composants sur la datasheet est nécessaire pour dimensionner l'emprunte correctement.

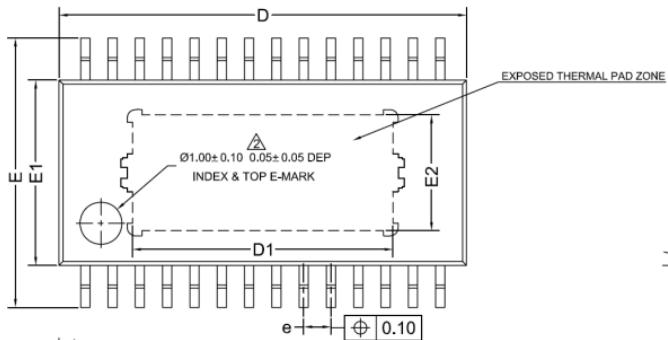


FIGURE 3.13

Parameter	[mm]	Ref	Min	Nom	Max
total thickness	A			1.2	
stand off	A1	0.05		0.15	
mold thickness	A2	0.90	1.00	1.10	
mold thickness over LF	A3	0.34	0.44	0.54	
lead width	b	0.2		0.29	
width w/o plating (optional plating)	b1	0.19	0.22	0.25	
b2	0.19			0.25	
lead frame thickness	c	0.13		0.18	
thickness w/o plating (optional plating)	c1	0.12	0.13	0.14	
c2	0.12			0.14	
body size X	D	9.60	9.70	9.80	
exposed die pad size Y	D1		6.20REF		
width over pins	E	6.20	6.40	6.60	
body size Y	E1	4.30	4.40	4.50	
exposed die pad size X	E2		2.75REF		
lead pitch	e	0.55	0.65	0.75	
lead	L	0.45	0.60	0.75	
lead length	L1		1.00REF		
	L2		0.25BSC		
	R	0.09			
	R1	0.09			
lead stand off	S	0.20			
	Θ	0°		8°	
	Θ1	10°	12°	14°	
	Θ2	10°	12°	14°	
	Θ3	10°	12°	14°	

FIGURE 3.14

Une fois que la fenêtre suivante s'affiche :

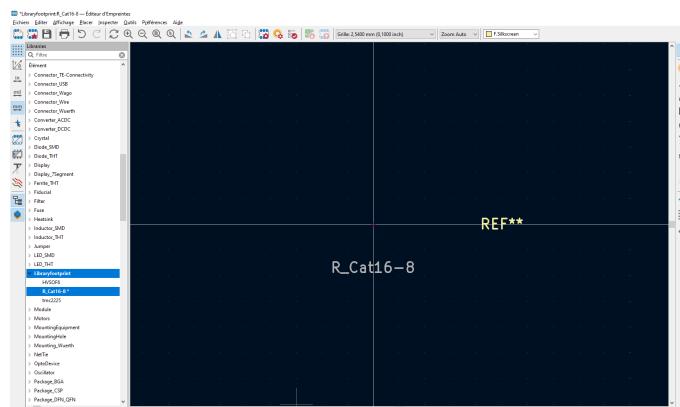


FIGURE 3.15

Les outils sur la droite permettent de dessiner le composant en respectant les dimensions de la datasheet et d'obtenir le résultat suivant :

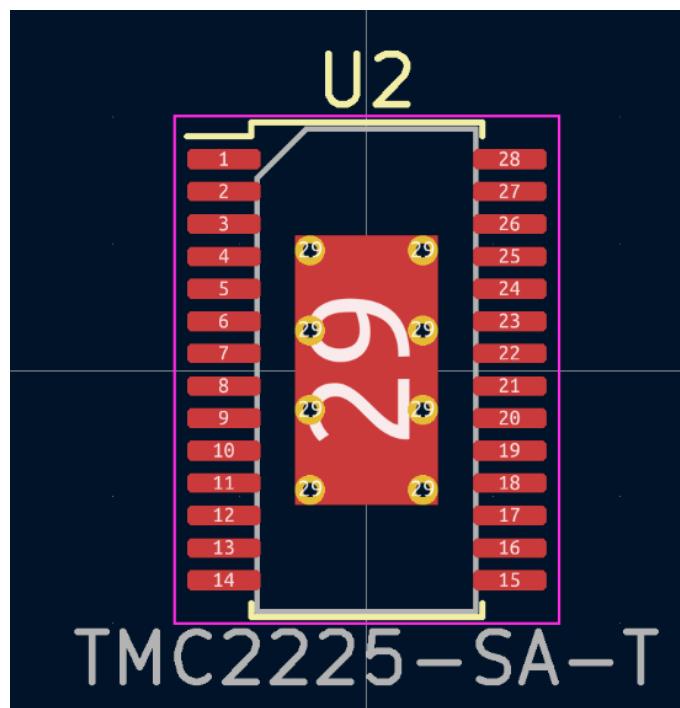


FIGURE 3.16

Une fois l'emprunte terminée, il reste à attribuer à chaque composant son emprunte qui ira sur le PCB. En allant dans l'option « assigner emprunte », les composants peuvent être liés à une emprunte qui se retrouvera sur le PCB :

Symbole: Attribution Empreintes		
1	C1 -	100u : Capacitor_SMD:CF_Elec_6.3x7.7
2	C2 -	470p : Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder
3	C3 -	220u : Capacitor_SMD:CF_Elec_8x10.5
4	C4 -	220u : Capacitor_SMD:CF_Elec_8x10.5
5	C5 -	2.2u : Capacitor_SMD:CF_Elec_4x5.7
6	C6 -	22n : Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder
7	C7 -	100n : Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric_Pad1.08x0.95mm_HandSolder
8	D1 -	STPS05202 : Diode_SMD:D_SOD-123
9	H1 -	MountingHole_Pad : MountingHole:MountingHole_3.2mm_M3_DIN965_Pad
10	H2 -	MountingHole_Pad : MountingHole:MountingHole_3.2mm_M3_DIN965_Pad
11	H3 -	MountingHole_Pad : MountingHole:MountingHole_3.2mm_M3_DIN965_Pad
12	H4 -	MountingHole_Pad : MountingHole:MountingHole_3.2mm_M3_DIN965_Pad
13	J1 -	Conn_01x02_Male : Connector_AMASS:AMASS_XTE0-M_1x02_P7.20mm_Vertical
14	J2 -	Conn_01x04_Male : Connector_PinHeader_2.54mm:PinHeader_1x04_P2.54mm_Vertical
15	J3 -	Conn_01x04_Female : Connector_PinSocket_2.54mm:PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical
16	L1 -	100u : Inductor_SMD:L_12x12mm_H6mm
17	R1 -	1.2K : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
18	R2 -	3.6K : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
19	R3 -	0.3 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
20	R4 -	0 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
21	R5 -	0 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
22	R6 -	0 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
23	R7 -	0 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
24	R8 -	1 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
25	R9 -	1 : Resistor_SMD:R_0603_1608Metric_Pad0.98x0.95mm_HandSolder
26	TP1 -	BUCK_OUT : TestPoint:TestPoint_Pad_D1.0mm
27	TP2 -	+5V : TestPoint:TestPoint_Pad_D1.0mm
28	U1 -	MC34063AD : Package_SO:SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm
29	U2 -	TMC2225-SA-T : Package_SO:HTSSOP-28-1EP_4.4x9.7mm_P0.65mm_EP2.85x5.4mm_ThermalVias

FIGURE 3.17

Il reste encore à dimensionner la taille de la carte ainsi qu'à définir les contraintes de dimensionnement des pistes, d'épaisseur d'isolation ect.



FIGURE 3.18

Classe d'Équipot	Isolation	Largeur Piste	Diam Via	Trou de via	Diamètre uVia	Trou de microvia	Largeur Paire Diff	Dist Paire Diff
Default	0.3 mm	0.25 mm	0.8 mm	0.4 mm	0.3 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.25 mm

FIGURE 3.19

Finalement, après importation des composants sur le PCB, il reste à les relier entre eux tel qu'établi dans le schéma électrique et en respectant les contraintes imposées pour obtenir le résultat suivant.

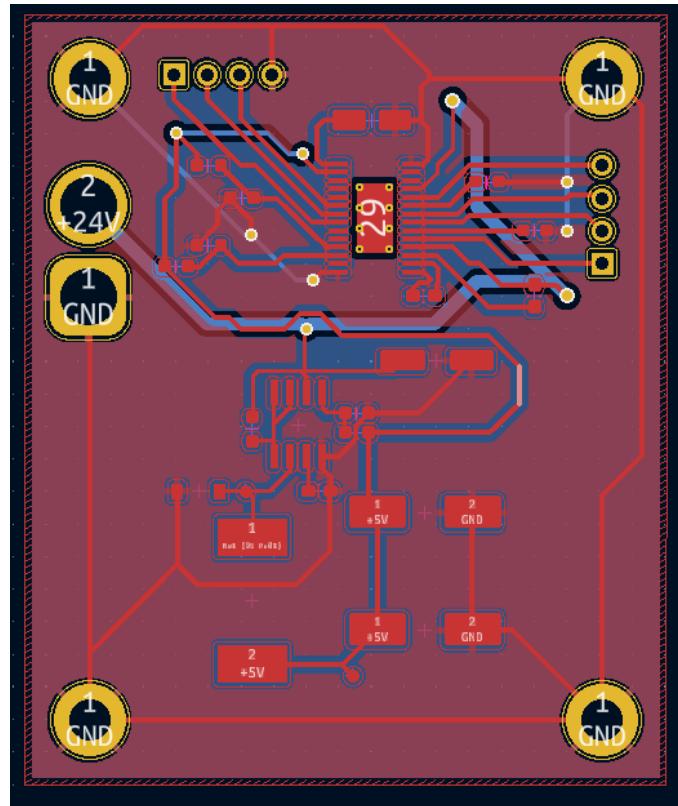


FIGURE 3.20 – PCB final.

Pour permettre l'impression, il faut (dans le cas ici) créer les fichiers gerber Front cuivre (les pistes de cuivre sur la partie haute du PCB), back cuvre (pistes de cuivre sur le dessous), Fmask et Bmask (tous les trous et les points de soudure), et edge cuts (dimensions du PCB).

Description générée automatiquement Une fois le PCB imprimé, il ne reste plus qu'à y souder les composants. Les valeurs des résistances sense sont définies selon recommandations de la datasheet

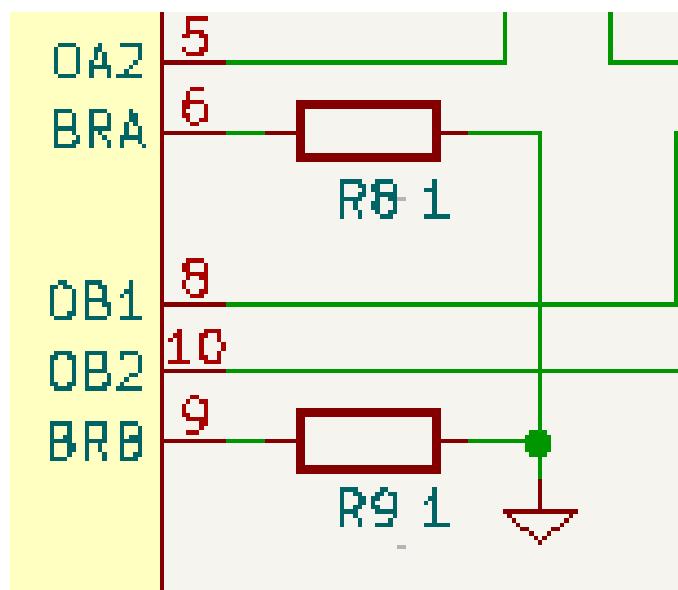


FIGURE 3.21 – Résistance dimensionnées.

CHOICE OF R_{SENSE} AND RESULTING MAX. MOTOR CURRENT		
R_{SENSE} [Ω]	RMS current [A] VREF=2.5V (or open), $IRUN=31$, $vsense=0$ (standard)	Fitting motor type (examples)
1.00	0.22	
0.82	0.27	
0.75	0.29	300mA motor
0.68	0.32	400mA motor
0.50	0.43	
470m	0.46	500mA motor
390m	0.55	600mA motor
330m	0.64	700mA motor
270m	0.77	800mA motor
220m	0.92	1A motor
180m	1.09	1.2A motor
150m	1.28	
120m	1.53*)	
100m	1.77*)	1.5A motor

FIGURE 3.22 – Les différentes valeurs de résistance.

Le moteur ayant un courant max de 800mA, la résistance sera de 270m ohms.

Aussi, les pins MS1 et MS2 seront reliées à 5V pour avoir le plus de précision possible sur les microsteps du moteur

MS1	25	DI (pd)	Microstep resolution configuration (internal pull-down resistors)
MS2	26	DT (pd)	MS2, MS1: 00: 1/4, 01: 1/8, 10: 1/16, 11: 1/32

FIGURE 3.23

4 Essai de commande moteur

Une fois le PCB imprimé et alimenté, le pilotage du moteur se fait par envoie d'un signal logique entre 0V et 5V sur la pin STEP grâce à la carte. A chaque front montant du signal, la position du stepper s'incrémente. La pin DIR (qui gère le sens de rotation du moteur) sera mise à la masse, comme la pin ENN (qui désactive le driver lorsqu'elle passe à un 1)

1.3.1 STEP/DIR Interface

The motor is controlled by a step and direction input. Active edges on the STEP input can be rising edges or both rising and falling edges as controlled by a special mode bit (DEDGE). Using both edges cuts the toggle rate of the STEP signal in half, which is useful for communication over slow interfaces such as optically isolated interfaces. The state sampled from the DIR input upon an active STEP edge determines whether to step forward or back. Each step can be a fullstep or a microstep, in which there are 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, or 256 microsteps per fullstep. A step impulse with a low state on DIR increases the microstep counter and a high state decreases the counter by an amount controlled by the microstep resolution. An internal table translates the counter value into the sine and cosine values which control the motor current for microstepping.

FIGURE 3.24 – Informations de la datasheet.

Le câblage final de l'ensemble :

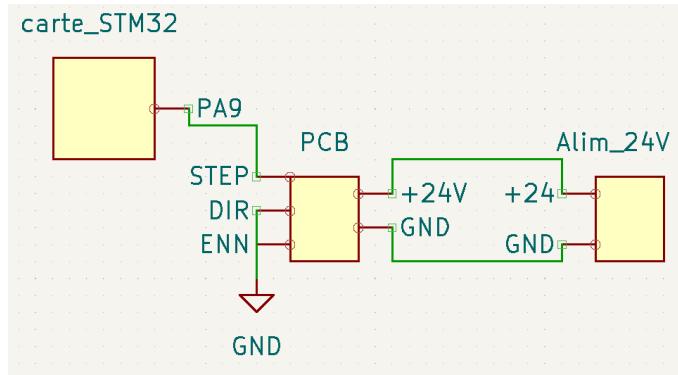


FIGURE 3.25 – Câblage final de l'ensemble.

La STM32 envoie un signal PWM de rapport cyclique 50%. Les lignes de code la générant sont les suivantes :

```
/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */

while (1)
{
    if(i==0)
    {
        HAL_GPIO_TogglePin(PIN1_GPIO_Port, PIN1_Pin);
        i++;
    }
    HAL_Delay(1);
    HAL_GPIO_TogglePin(PIN1_GPIO_Port, PIN1_Pin);

    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
```

FIGURE 3.26 – Capture du code.

Cependant, en envoyant cette PWM sur la pin STEP et en réalisant le cablage ci-dessus, le moteur ne tourne pas. Une mesure au voltmètre permet de s'assurer qu'il y a bien 24 volts à l'entrée des pins du driver qui requierent 24V et 5V pour celles qui requièrent 5V. Le problème ne vient donc pas du buck et de la partie alimentation du PCB. En visualisant la sortie de la broche PA9 à l'oscilloscope, une PWM telle qu'attendu est affichée. Le problème vient donc du composant TMC2225 et nous ne comprenons pas d'où peut venir le problème de pilotage. Nous avons également vérifié que le problème de venait pas de l'état du composant puisque celui-ci a été changé .

Troisième partie

Rétrospective et Expérience

1 Apprentissage technique, difficultés rencontrées

A l'issue de ce projet, il convient de prendre un peu de recul et de regarder nos résultats de manière critique.

Nous ne sommes pas parvenus à réaliser un robot complet à 6 axes dans le temps qui nous était imparti. Le robot réel est partiellement assemblé, et certaines pièces sont encore à concevoir.

Concernant la commande des moteurs, celle des steppers n'a pas pu être réalisée à temps.

Et sommes, beaucoup de choses restent à faire. Nous aurions aimé en faire plus, mais malgré notre motivation et notre travail personnel en dehors des heures attribuées au projet pour essayer d'avancer au mieux, nous n'y sommes pas parvenus.

Certaines difficultés peuvent expliquer ce résultat, que nous allons maintenant vous présenter :

Concernant la commande des steppers, il a fallut réaliser des PCB. Nous avons perdu beaucoup de temps sur cette partie, ayant eu beaucoup de problèmes techniques, certains indépendants de notre volonté, d'autres non.

Concernant la réalisation des pièces mécaniques, nous avons eu de nombreuses difficultés à surmonter, n'ayant pas spécialement l'habitude de SolidWorks et apprenant sur le tas. Par exemple, nous pouvons citer le problème des roues dentées que nous avons rencontré à plusieurs reprises. Nous avons, en effet, eu des difficultés à utiliser la toolbox de solidworks, notamment la modification de ces pièces par la suite. Pour avancer tout de même, nous avons décidé de faire nous même le dessin des dents, après l'aide de différentes explications que nous avons pu trouver.

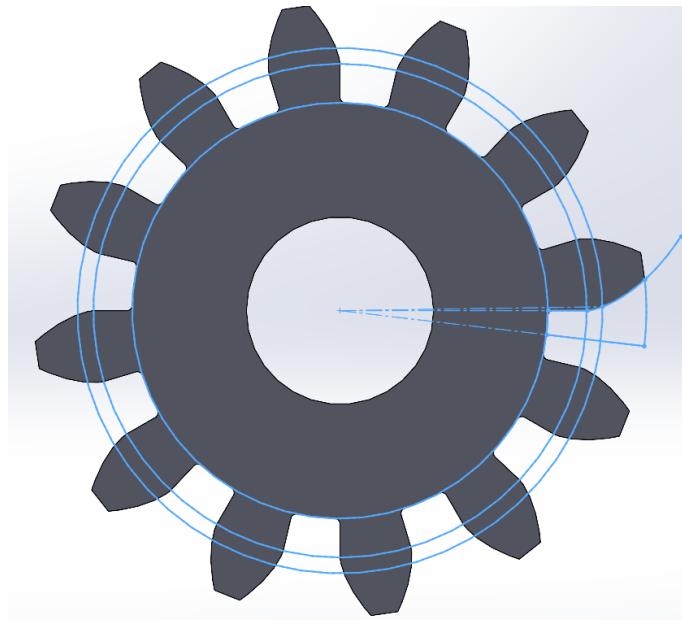


FIGURE 3.27 – Roue dentée "maison".

Une grande partie du projet reposait sur cette partie mécanique et le design des pièces. Nous n'avons pas été trop de deux personnes pour réaliser cette partie.

Enfin, nous souhaitons rappeler que nous n'étions que trois sur ce projet. Initialement quatre, nous avons perdu un membre, et cela nous a fortement impacté.

Néanmoins, ce projet a de très bons côtés. En effet, ce qui a pu être réalisé est globalement satisfaisant de notre point de vue, et nous en sommes fiers.

Nous avons aussi beaucoup appris techniquement, et avons pu développer nos compétences en design de PCB, de pièces mécaniques, de montage, etc. Les problèmes que nous avons eu à surmonter nous ont bien formé, et nous nous sentons bien plus à l'aise, notamment dans le module de mécanique de l'option.

2 Développement personnel

Ce projet nous a aussi permis de développer des compétences humaines. Nous avons dû faire preuve d'astuce et de créativité face aux différents problèmes rencontrés afin d'avancer. Nous avons aussi fait preuve d'initiative ainsi que d'une certaine autonomie.

Nous avons également énormément développé nos capacités à travailler en équipe et à communiquer, ayant besoin d'échanger de nombreuses idées et données techniques.

Conclusion

Pour conclure ce rapport de projet, nous dirons ceci : certes, la mission n'a pas été totalement remplie. Le robot n'est pas entièrement terminé ni mobile, ayant rencontré un certain nombre de difficultés.

Cependant, nous avons beaucoup appris et développé un certain nombre de compétences techniques et humaines qui nous serons d'une très grande utilité dans la suite de notre parcours.

Et surtout, nous avons pris beaucoup de plaisir.

Bibliographie

- [1] Article pour les calculs de transmission de puissance par engrenages
http://www.gecif.net/articles/mecanique/cours/TRANSMISSION_DE_PUISSANCE_PAR_ENGRENAGES.pdf
- [2] Cours sur les engrenages
<http://barreau.matthieu.free.fr/cours/engrenages.pdf>
- [3] Cours sur le train épicycloïdal
<http://joho.p.free.fr/EC/COURS%20DOC/ENGRENAGES/TRAINS%20D%20ENGRENAGES/TRAIN%20EPICYCLOIDAL%20SIMPLE.pdf>
- [4] Site sur les types de pinces de préhension dans le milieu de la robotique
<https://soft-gripping.com/fr/discover/un-guide-complet-des-pinces/>
- [5] Datasheet du TMC2225
https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2225_Datasheet_Rev1.11.pdf