

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de master en
Fabrication mécanique et productique**

**CONCEPTION ET REALISATION D'UNE MACHINE DE
DECOUPAGE A FIL CHAUD**

**Présenté par : RAMOUL HAMZA
HANAIA TAKI EDDINE**

Promoteur : Dr. CHETTIBI TAHA

Session : juin 2024

Remerciements

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur

*Dr. **Chettibi Taha** pour l'orientation, la confiance, la patience ce qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés et nous ont permis de poursuivre nos études et qui, par leurs compétences, ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Avant tout, je remercie **DIEU** de m'avoir donné le courage et la Patience, pour accomplir ce travail*

Je dédie ce travail...

A mon père et ma mère

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez.

A tous les membres de ma famille.

A mon cher frère Foufa, Omar, Brahim, Hocine BOUZID et ma sœur Maryam pour leur appui et leur encouragement.

A quelqu'un dont la valeur est inestimable. "M. Cookie"

A tous mes amis fidèles Abdou, Chirif et Toufik et une spéciale dédicace à mon binôme HAMZA et son père et sa mère pour sa disponibilité, sa patience et sa motivation tout au long de la recherche.

A toutes mes amies résidences universitaires à Baya Mahieddine Blida

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail.

Merci à vous tous.

Taki eddine

*Avant tout, je remercie **DIEU** de m'avoir donné le courage et la Patience, pour accomplir ce travail*

Je dédie ce travail A mon père et ma mère et mes frères et sœurs et tous ceux qui m'ont soutenu pendant mon parcours d'études,

A mon père et ma mère

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez.

A tous les membres de ma famille.

A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail.

Merci à vous tous.

HAMZA

Résumé :

Ce projet de fin d'études a pour objectif de mettre en œuvre une machine de découpage à fil chaud. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué dans un premier temps une large exploration des machines de découpe à fil chaud à commande numérique CNC, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs applications et leurs avantages par rapport à d'autres méthodes de découpe. L'étude souligne la polyvalence, la précision et le caractère économique de la découpe à fil chaud, qui est particulièrement efficace pour des matériaux comme les mousses synthétiques. En effet, cette méthode se distingue par sa capacité à réaliser des coupes précises avec peu de déchets et à des vitesses de production rapides.

Par la suite, l'étude approfondit l'analyse des différentes architectures de machines de découpe à fil chaud (MDFC), offrant une compréhension claire des solutions technologiques employées. Sur cette base, nous avons conçu une machine à quatre axes, en commençant par une analyse fonctionnelle et l'élaboration d'un cahier des charges réalisable. Les solutions technologiques sont sélectionnées afin d'assurer une performance optimale et sécuriser le fonctionnement du système.

La mise en œuvre comprenait l'impression 3D des pièces, l'assemblage des systèmes de guidage, la construction de la structure principale, ainsi que l'intégration des composants électriques et informatiques. Cette intégration était cruciale pour une interaction fluide entre les éléments mécaniques et les systèmes de contrôle. La génération précise du G-code a été essentielle pour obtenir des découpes de haute qualité.

En somme, ce projet souligne l'importance d'une approche méthodique et intégrée, depuis la conception initiale jusqu'à l'exécution finale, pour réussir le développement d'une machine de découpe CNC à fil chaud. Grâce à une planification minutieuse et à l'utilisation de technologies appropriées, nous avons démontré la faisabilité de réaliser une MDFC efficace et fiable répondant aux exigences du cahier des charges et celles de la fabrication moderne.

Mots clés : *découpage a fil chaud, machine CNC, conception, programmation G-CODE, Fabrication.*

ملخص

هذا مشروع التخرج يهدف إلى تنفيذ آلة قطع بالسلك الساخن. لتحقيق هذا الهدف، قمنا في المرحلة الأولى بإجراء استكشاف شامل لآلات القطع بالسلك الساخن ذات التحكم الرقمي CNC، مسلطين الضوء على مبادئ عملها، وتطبيقاتها، ومزاياها مقارنة بطرق القطع الأخرى. تسلط الدراسة الضوء على التنوع والدقة والاقتصادية للقطع بالسلك الساخن، التي تكون فعالة بشكل خاص للمواد مثل الرغوات الاصطناعية. فعلاً، تتميز هذه الطريقة بقدرتها على إجراء قطع دقيقة مع إنتاج قليل من النفايات وبسرعات إنتاجية سريعة.

بعد ذلك، تقوم الدراسة بتعميق تحليل التصميم المختلفة لآلات القطع بالسلك الساخن، مما يوفر فهماً واضحاً للحلول التكنولوجية المستخدمة. استناداً إلى هذا الأساس، قمنا بتصميم آلة بأربعة محاور، بدءاً من تحليل وظيفي وصياغة كتاب مواصفات قابل للتنفيذ. تم اختيار الحلول التكنولوجية لضمان أداء مثالي وتأمين تشغيل النظام بشكل آمن.

شمل التنفيذ طباعة ثلاثية الأبعاد للأجزاء، وتجميع أنظمة التوجيه، وبناء الهيكل الرئيسي، بالإضافة إلى دمج الأجزاء الكهربائية والحاسوبية. كان هذا التكامل حاسماً لتفاعل سلس بين العناصر الميكانيكية وأنظمة التحكم. كانت إنشاء رمز G-code الدقيق أمراً أساسياً للحصول على قطع عالية الجودة.

باختصار، يبرز هذا المشروع أهمية نهج منهجي متكامل، من التصميم الأولي إلى التنفيذ النهائي، لنجاح تطوير آلة قطع CNC بالسلك الساخن. من خلال التخطيط الدقيق واستخدام التقنيات المناسبة، قمنا بإظهار إمكانية تنفيذ MDFC فعالة وموثوقة تلبي متطلبات كتاب المواصفات ومتطلبات التصنيع الحديث.

كلمات مفتاحية: تقطيع بالسلك الساخن، آلة CNC ، تصميم، برمجة G-CODE ، تصنيع.

Abstarct :

This end-of-studies project aims to implement a hot wire cutting machine. To achieve this objective, we first conducted extensive research on CNC hot wire cutting machines, highlighting their operating principles, applications, and advantages over other cutting methods. The study emphasizes the versatility, precision, and cost-effectiveness of hot wire cutting, which is particularly effective for materials like synthetic foams. Indeed, this method stands out for its ability to make precise cuts with minimal waste and at rapid production speeds.

Subsequently, the study delves into the analysis of various architectures of hot wire cutting machines (MDFC), providing a clear understanding of the technological solutions employed. Based on this foundation, we designed a four-axis machine, starting with functional analysis and the development of a feasible specification document. Technological solutions were selected to ensure optimal performance and secure system operation.

Implementation included 3D printing of parts, assembly of guiding systems, construction of the main structure, and integration of electrical and computer components. This integration was crucial for smooth interaction between mechanical elements and control systems. Precise generation of G-code was essential to achieve high-quality cuts.

In conclusion, this project underscores the importance of a methodical and integrated approach, from initial design to final execution, in successfully developing a hot wire CNC cutting machine. Through careful planning and the use of appropriate technologies, we demonstrated the feasibility of creating an efficient and reliable MDFC that meets both the requirements of the specification document and those of modern manufacturing.

Keywords: *hot wire cutting, CNC machine, conception, G-CODE programming, fabrication.*

Sommaire

I.	Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur la découpe à fil chaud		
I.	Introduction	2
II.	Principe de base de la découpe	2
III.	Les machines à commande numérique.....	3
IV.	Les applications de la découpe à fil chaud de polystyrène	4
V.	Quelles matières à découper à l'aide de ce type des machines	6
VI.	Conclusion	8
Chapitre 2 : Analyse technologique des machines de découpage à fil chaud.....		
I.	Introduction	9
II.	Les modes de découpage à fil chaud.....	9
II.1	Les systèmes de découpage manuels.....	9
II.2	Les systèmes de découpe automatisés	10
III.	Architecture d'une machine de découpage par fil chaud à commande numérique	11
III.1	Partie opérative :	11
III.2	Partie commande	12
IV.	Paramètres du procédé de découpage	12
IV.1	Paramètres énergétiques	14
IV.2	Propriétés des matériaux	14
IV.2.1	Mousses plastiques	14
IV.2.2	Les outils de coupes.....	14
IV.3	Géométrie de l'outil	15
V.	Les solutions technologiques	15
VI.	Conclusion	17
Chapitre 3 : Conception d'une machine de découpage à quatre axes		
I.	Introduction	18
II.	Cahier des charges	18
II.1	Fonction principale	18
II.2	Fonction partielles.....	18
II.3	Spécifications techniques	19
II.4	Spécifications économiques.....	19
II.5	Spécification opérationnelles.....	19
III.	Analyse fonctionnelle	19
III.1	Etude de besoin.....	19

III.2 Analyse fonctionnelle externe	20
III.3 Analyse fonctionnelle interne	22
IV. Architecture et conception de notre MDFC-CNC.....	23
IV.1 Solution technologiques	24
IV.1.1 Sous-système de déplacement le long de x.....	25
IV.1.2 Sous-système de déplacement le long de z	27
IV.1.3 Sous-système de rotation autour de z.....	30
IV.2 Analyse de l'espace de travail de la machine	32
IV.3 Dimensionnement des organes	32
IV.3.1 Estimation des masses.....	33
IV.3.1.1 Sur l'axe de Z	33
IV.3.1.2 Sur l'axe de X	34
IV.3.2 Calcul de courroie.....	34
IV.3.2.1 Calcul de courroie sur axe Z	34
IV.3.2.2 Calcul de courroie sur axe de X.....	35
IV.3.3 Etude statique	38
IV.3.3.1 Cadre de l'axe Z	38
IV.3.3.2 Supports des moteurs de l'axe Z	40
IV.3.3.3 Support de moteur de la table rotative	42
IV.3.3.4 Support de moteur de l'axe x	44
IV.3.4 Etude RDM	46
IV.3.4.1 Calcul de l'effort tranchant $T(x)$ et du moment fléchissant $M(x)$	46
IV.3.4.2 Calcul de la déformation	47
IV.3.5 Choix de moteur.....	48
IV.3.5.1 Choix de moteur pour le déplacement de l'axe Z.....	48
IV.3.5.2 Choix de moteur pour le déplacement de fil.....	49
IV.3.6 Vérification de choix de roulement	49
IV.3.6.1 Vérification de roulement sur l'axe Z.....	50
IV.3.6.2 Vérification de roulement de roulement sur l'axe X	51
IV.3.7 Génération de la chaleur à travers le fil	51
IV.3.7.1 Les essais	52
V. Conclusion	54
Chapitre 4 : Réalisation de la machine.....	
I. Introduction	55
II. Mise en œuvre de la partie mécanique.....	55
II.1 Réalisation de pièces en impression 3D	55

II.1.1 Logiciel CURA.....	55
II.1.2 Utilisation de logiciel CURA.....	55
II.2 Réalisation de la structure	58
II.3 Réalisation des systèmes de guidage	59
II.3.1 Réalisation de système de guidage selon l'axe X	59
II.3.2 Réalisation de système de guidage selon l'axe Z.....	60
II.3.3 Réalisation de la table rotative.....	60
II.4 Assemblage final	61
III. Mise en œuvre de la partie électrique	62
III.1 présentation des différents éléments	62
III.2 Réglage le driver A4988	62
III.3 Réglage de fil chaud.....	63
III.4 Schéma du circuit de découpage de mousse CNC avec Arduino	64
IV. Mise en œuvre de la partie informatique	65
IV.1 Description de schéma de pilotage par PC.....	65
IV.2 Description des logiciels utilisés.....	65
V. Configuration de la MDFC.....	66
VI. Tests expérimentaux	68
VI.1 Génération du G-CODE.....	68
VI.2 Lancement de découpe	69
VII. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72
Bibliographie	73
Annex	76

Liste des figures

Figure 1.1 : découpe de mousse [1].	6
Figure 1.2 : Découpe de Polystyrène Expansé (EPS) [2].	7
Figure 1.3 : Polystyrène Extrudé (XPS) [3].	7
Figure 1.4 : Mousse Polyuréthane [4].	7
Figure 1.5 : Polystyrène Renforcé [5].	7
Figure 1.6 : Caoutchouc Mousse [6].	8
Figure 1.7 : Mousse Rigide [1].	8
Figure 2.1 : Exemples de MDFC proposées à la vente sur les sites alibaba et amazon.	9
Figure 2.2 : Découpage manuel, 1 ^{ère} configuration [7].	10
Figure 2.3 : Découpage manuel, 2 ^{ème} configuration [8], [9].	10
Figure 2.4 : Machines de découpe à un seul degré de liberté proposées par la société zimlin[10]: (a) horizontale, (b) verticale, (c) rotative	11
Figure 2.5 : Machines à plusieurs degrés de liberté [11]. (a) à 2 D.D.L., (b) à 3 D.D.L., (c) à 4 D.D.L., (d) à 8 D.D.L.	11
Figure 2.6 : les mécanismes de coupe [12].	13
Figure 2.7 : Principaux paramètres affectant la qualité de découpe dans les mousses plastiques.	14
Figure 2.8 : système vis-écrou utilisant des vis à billes trapézoïdale [15][16].	15
Figure 2.9 : tige de guidage en acier [16].	16
Figure 2.10 : Moteur pas à pas de type Nema [17].	16
Figure 2.11 : Roulement douilles à billes [18] [19].	16
Figure 2.12 : système de guidage [14].	17
Figure 2.13 : système poulie courroie [20] [21].	17
Figure 2.14 : Système de guidage a galets [16].	17
Figure 3.1 : Diagramme bête à cornes d'une MDFC .	20
Figure 3.2 : Diagramme pieuvre	21
Figure 3.3 : Diagramme FAST.	22
Figure 3.4 : Diagramme FAST de la fonction FT31.	23
Figure 3.5 : Architecture globale de la MDFC.	24
Figure 3.6 : Schéma cinématique de la MDFC.	24
Figure 3.7 : Modelé CAO-3D de la MDFC-CNC.	25
Figure 3.8 : Dimensionnement de l'axe X.	26
Figure 3.9 : Nomenclatures des pièces (axe x).	27
Figure 3.10 : Axe z.	28
Figure 3.11 : Pièce Support de fil de découpe.	28
Figure 3.12 : guide horizontale de l'axe Z.	29
Figure 3.13 : Nomenclatures des pièces (axe z).	30
Figure 3.14 : Nomenclatures des pièces (table de l'axe z).	30
Figure 3.15 : Limites de fonctionnement de la MDFC.	32
Figure 3.16 : sélection du pas [22].	36
Figure 3.17 : Transmissions par poulies et courroies.	36
Figure 3.18 : diagramme des efforts tranchants.	47
Figure 3.19 : diagramme du moment fléchissant.	47
Figure 3.20 : solution pour réduire le déplacement.	48
Figure 3.21 : les roulements d'axe Z.	50
Figure 3.22 : roulement de l'axe X.	51
Figure 3.23 : caméra thermique UTi120T.	52

Figure 3.24 : température de fil dans le 1 ^{er} essai.	53
Figure 3.25 : température de fil dans 2 ^{ème} essai.	53
Figure 4.1 : schéma de l'impression 3D.	55
Figure 4.2 : ajoute de la machine dans Cura.	56
Figure 4.3 : Paramètres de l'impression.	57
Figure 4.4 : Pré-visualiser l'état final de la pièce avant impression.	57
Figure 4.5 : installation de la tige.	58
Figure 4.6 : installation de la tige de l'axe Z.	58
Figure 4.7 : les supports de moteur et la tige.	58
Figure 4.8 : système de motorisation de l'axe X.	59
Figure 4.9 : renforcé de l'axe Z.	59
Figure 4.10 : attachement de courroie.	60
Figure 4.11 : Mécanisme de guidage de l'axe Z.	60
Figure 4.12 : profile de la table.	61
Figure 4.13 : Assemblage final.....	61
Figure 4.14 : a) Driver A4988 / b) CNC shield / c) Arduino UNO / d) Alimentation 12V 6A /	62
Figure 4.15 : réglage de driver A4988.....	63
Figure 4.16 : tendeur de fil.	63
Figure 4.17 : schéma global du câblage des moteurs avec Arduino CNC Shield.....	64
Figure 4.18 : Les cavaliers.	64
Figure 4.19 : branchement des câbles.	64
Figure 4.20 : schéma globale de pilotage par PC.....	65
Figure 4.21 : Téléchargement de GRBL.....	65
Figure 4.22 : arduino IDE.....	66
Figure 4.23 : interface de UGS.....	66
Figure 4.24 : connecter l'arduino avec UGS.	67
Figure 4.25 : réglage des steps/mm.	67
Figure 4.26 : insérée le logo dans inkscape.....	68
Figure 4.27 : points d'orientation.....	69
Figure 4.28 : définir l'outil.....	69
Figure 4.29 : ouverture de G-CODE dans UGS.....	70
Figure 4.30 : logo de Saad Dahleb.	70
Figure 4.31 : exemples d'utilisation de la MDFC développée.....	71

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Tableau questions/réponse relatif au besoin.	19
Tableau 3-2: fonctions de service.....	21
Tableau 3-3: Principaux composants utilisés pour la réalisation de la machine.....	31
Tableau 3-4: les estimations des masses des différents éléments de l'axe z.	33
Tableau 3-5: les estimations des masses des différents éléments de l'axe x.	34
Tableau 3-6: Tableau facteur de service [23].....	37

Liste des symboles

mi ou Q : la masse totale.

Ps : puissance de calcul.

Pc : puissance de construction.

Ks : facteur de service.

C : entraxe.

V : vitesse linéaire

N : nombre de tours.

T(x) : effort tranchant.

M(x) : moment fléchissant.

n : rendement sommaire.

L10 : durée nominale.

C : charge dynamique de base.

P : la charge.

F : la force.

L10h : durée de service nominale.

I : le courant.

V : la tension.

R : la résistance.

I. Introduction générale

La découpe au fil chaud, également connue sous le nom de découpe thermique, est une technique de découpe utilisée dans une variété de domaines industriels et artistiques. Elle repose sur l'utilisation d'un fil métallique chauffé à haute température pour trancher à travers différents matériaux. Cette méthode offre une grande précision et la possibilité de découper des formes complexes dans des matériaux tels que le polystyrène, le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé, le polyuréthane, les mousses synthétiques et même certains métaux. Grâce à sa polyvalence et à sa capacité à produire des coupes nettes et précises, la découpe au fil chaud est devenue un outil incontournable dans de nombreux secteurs, de l'industrie de la construction à la fabrication de maquettes architecturales en passant par la création artistique.

Dans ce mémoire, nous examinons de près ce processus de découpage du polystyrène avec fil chaud puis nous abordons la problématique de conception et réalisation d'une machine de la découpe à fil chaud, pilotée par ordinateur. En fait, le développement d'une machine CNC haute performance nécessite une attention particulière aux mécanismes existants et à la résolution des limitations. Contrôler les paramètres de découpe est essentiel pour garantir la qualité du produit et éviter les erreurs. Un contrôle précis est nécessaire pour le trajet correct du fil chauffant. La recherche dans ce domaine met en avant la nécessité d'explorer de nouvelles méthodes et mécanismes, avec des paramètres clés comprenant le matériau du fil, les dimensions, la vitesse, la température, la tension et la largeur de la fente. Les capacités de notre machine seront explorées à travers la réalisation de pièces de différentes complexités.

En fait, notre projet s'inscrit dans le cadre de différentes activités entreprises au niveau du Laboratoire Structures, au sein du département de mécanique de l'université de Blida 1 visant la réalisation de machines pilotées par ordinateur pour répondre à des besoins industriels précis et aussi développer des outils de soutien à la formation des étudiants de l'Université de Blida 1 en Conception et Fabrication Mécaniques.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre portera sur un état de l'art et des généralités sur le procédé de découpe à fil chaud ainsi que les machines de fabrication à commande numérique dites CNC. Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse technologique des principales machines à découpage à fil chaud existantes sur le marché. Le troisième chapitre aborde la conception mécanique d'une machine de découpage à quatre axes. Le quatrième chapitre concerne la mise en œuvre de la machine en abordant les parties électrique & informatique. Des réalisations de pièces seront présentées pour illustrer les capacités de la machine ainsi développée. Le manuscrit est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 : Généralités sur la découpe à fil chaud

I. Introduction

Les procédés de fabrication mécanique englobent un large éventail de techniques utilisées pour façonner et transformer les matières premières en produits finis, en utilisant principalement des machines-outils et des méthodes mécaniques. Ces procédés sont fondamentaux dans de nombreux secteurs industriels, allant de l'automobile à l'aérospatiale, en passant par l'ingénierie médicale et l'électronique. Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique qu'on rencontre dans l'industrie, on peut citer :

- **Les procédés d'usinage conventionnel** : Cela inclut des techniques telles que le tournage, le fraisage, le perçage et le meulage, où des machines-outils coupent, enlèvent ou façonnent des pièces de métal ou de plastique selon des tolérances précises.
- **Les procédés de moulage par injection** : Ce type de procédé consiste à injecter du plastique fondu dans un moule pour produire des pièces avec une grande précision et une répétabilité élevée. Il est largement utilisé dans la fabrication de composants plastiques pour diverses industries.
- **Les procédés de forgeage et d'estampage** : Ces procédés impliquent la mise en forme de métaux à haute température à l'aide de presses ou de marteaux pour obtenir des pièces avec une résistance et une durabilité accrue.
- **Les procédés d'assemblage mécanique** : Cela inclut l'assemblage de pièces en utilisant des techniques telles que le vissage, le rivetage, le soudage et l'agrafage pour créer des structures ou des produits finis.
- **Les procédés de découpage** : Cela inclut le découpage au laser, au jet d'eau, au fil chaud. Chacun de ces procédés à son propre principe de fonctionnement, il est dédié à une classe particulière de matériaux et permet de réaliser des opérations bien précises. Par exemple, le découpage au laser utilise un faisceau laser concentré et permet de découper, de graver ou de marquer divers matériaux, y compris le métal, le bois, le plastique et le verre, avec une grande précision et une finition de haute qualité. Par contre, le découpage au jet d'eau utilise un jet d'eau haute pression mélangé à des abrasifs pour découper des matériaux durs comme le métal, la pierre, le verre et le plastique, offrant une découpe précise sans générer de chaleur.

Dans notre étude, on est particulièrement concerné par le procédé de découpage à fil chaud qui constitue un procédé de fabrication mécanique assez simple qui permet de découper divers matériaux sur la base d'un processus thermique. Cette technique peut être utilisée pour découper des matériaux tels que les mousses plastiques.

II. Principe de base de la découpe

La découpe au fil chaud constitue une méthode thermomécanique pour découper la mousse, particulièrement adaptée à la fabrication à faible volume. Dans cette méthode, une source de chaleur (comme un fil) est utilisée pour modifier les propriétés physiques du matériau, permettant ainsi une découpe avec une force de coupe minimale.

Il existe plusieurs mécanismes pour la découpe de la mousse plastique. Ces mécanismes façonnent le processus de découpe et peuvent être divisés en trois modes de base ou en une combinaison entre eux. Ils comprennent :

- **Découpe thermique** : Dans ce mode, la mousse plastique est vaporisée ou fond à proximité du fil de découpe sans entrer en contact direct.

- Découpe thermomécanique : Ce mode résulte d'une combinaison de la force de cisaillement et de la fusion du matériau pour effectuer la découpe, avec l'outil chaud entrant en contact avec le matériau.
- Découpe mécanique : Ce mode dépend de la force de cisaillement et se produit lorsque la température de l'outil est inférieure au point de fusion de la mousse.

Le processus de découpe au fil chaud implique de faire passer un fil chauffé à travers le matériau à découper, créant ainsi une coupe nette et précise. Cette méthode est particulièrement efficace pour découper des matériaux tels que le polystyrène, le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé, le polyuréthane et diverses mousses synthétiques. Elle peut également être utilisée pour découper certains métaux à des températures et vitesses appropriées.

Lorsque le fil chaud entre en contact avec la surface de la mousse, il fait fondre la zone environnante, la chaleur du fil vaporise la mousse, créant une surface lisse. Le fil se déplace à travers l'échantillon de matériau en mousse selon les ordres donnés généralement par une commande numérique (CNC), permettant ainsi de réaliser la forme souhaitée. Ce processus permet l'exécution de tout profil en deux dimensions.

Le matériau à découper est simplement assoupli sous le point de fusion car il s'agit d'un matériau thermoplastique. Ensuite, la découpe est effectuée. La qualité de la surface coupée et la largeur de la fente sont affectées par les variations du taux d'avance, même si elles sont minimes, ainsi que par le diamètre du fil.

Ainsi, le principe fondamental de la découpe des mousses plastique (polystyrène ou de tout autre matière thermo fusible) par l'intermédiaire d'un fil chaud ne repose pas sur une action mécanique directe du fil sur la matière, mais plutôt de l'action de la couche d'air chaud entourant le fil, c'est à dire par rayonnement thermique. Il n'y a donc pas de contact direct entre le fil et la matière, en utilisation normale. Une découpe de qualité nécessite un réglage approprié de la température du fil et de la vitesse de déplacement de celui-ci [9].

La découpe est ainsi effectuée par le déplacement du fil chaud sur deux axes (ou plus), permettant au fil chaud de faire fondre la matière lors de son passage, et ainsi de réaliser la forme souhaitée. La forme à découper est obtenue grâce à un fichier graphique vectoriel provenant d'un logiciel de dessin favori (pour le cas des machines numériques). Ce fichier est traité dans un autre logiciel de traitement, pour qu'il soit converti en déplacements machine. Le calcul du parcours du fil est fait d'une manière à ce que aucun contour à découper ne soit raté.

Il existe deux catégories de machines de découpe de mousse à fil chaud [1]. La première catégorie, utilise un fil rigide préformé pour découper des profils prédéterminés. Des recherches en cours explorent la flexion de ce fil pendant le processus de découpe, dans le but de générer des formes convexes ou concaves à partir d'un seul bloc de mousse solide. Dans la deuxième catégorie, on utilise un fil mince tendu qui reste droit pendant la découpe. Le fil est chauffé par un courant, par conséquent, il doit avoir une haute résistance interne en tant que conducteur électrique et une bonne résistance à la corrosion à température élevée. Le matériau généralement utilisé pour le fil est l'acier inoxydable ou le nichrome et le diamètre du fil chaud est à partir de 0,2 mm.

III. Les machines à commande numérique

Apparue il y a seulement quelques décennies, la Commande Numérique CN est aujourd'hui largement utilisée dans le domaine de l'usinage. Son concept, destiné à diriger le fonctionnement d'une machine à partir des instructions d'un programme sans nécessiter l'intervention directe de l'opérateur pendant son exécution, a d'abord révolutionné l'automatisation des machines-outils

traditionnelles telles que les fraiseuses, perceuses, aléuseuses, etc. Ces machines sont ainsi devenues capables d'assurer une production en termes de qualité et de quantité qui paraissait à peine envisageable quelques années auparavant.

Actuellement associée de plus en plus aux avancées de la microélectronique et de l'informatique, la CN voit ses performances s'améliorer régulièrement, tandis que son coût et son encombrement ne cessent de diminuer. Ainsi, elle s'intègre progressivement dans les petites entreprises et devient accessible à tous les secteurs industriels faisant appel aux procédés de positionnement ou de suivi de trajectoire.

Les CN modernes sont en mesure d'effectuer des mouvements combinés simultanément sur les axes X, Y et Z, et on les désigne sous le nom de commandes numériques par ordinateur. De plus, elles sont capables de gérer plusieurs axes simultanément grâce à ce que l'on appelle l'interpolation.

En ce qui concerne la découpe par fil chaud, il convient de noter que la CN offre également ses avantages dans ce domaine, permettant une précision accrue et une automatisation efficace du processus de découpe par fil chaud.

Une machine à commande numérique par ordinateur dite CNC est une machine-outil automatisée qui est contrôlée par un ordinateur et des programmes informatiques plutôt que par une intervention manuelle directe. La caractéristique principale d'une machine CNC est sa capacité à exécuter des tâches complexes et précises en suivant des instructions numériques. Ces instructions, généralement sous la forme de programmes informatiques, définissent les mouvements et les opérations spécifiques que la machine doit effectuer sur une pièce de travail.

En général, les machines CNC sont équipées d'actionneurs qui déplacent les outils de coupe ou la pièce elle-même selon les coordonnées précises définies dans le programme CNC. Les avantages des machines CNC incluent une productivité accrue, une grande précision, une reproductibilité élevée des pièces, et la possibilité de produire des pièces complexes et personnalisées.

Les machines CNC comprennent des équipements tels que des fraiseuses CNC, des tours CNC, des machines de découpe laser CNC, des machines de découpe par plasma CNC, des imprimantes 3D CNC, des machines découpage par fil à chaud CNC, et bien d'autres, chacune étant adaptée à des applications spécifiques. D'une façon générale, l'usage des commandes numériques par ordinateur (CNC) permet de générer des géométries complexes. Ainsi, les machines de découpe de mousse contrôlées par ordinateur offrent des avantages pour le prototypage rapide à grande échelle et la fabrication, tels que des temps de construction rapides et des coûts de matériau faibles. Cependant, leur capacité à créer des caractéristiques géométriques complexes est limitée par l'utilisation d'outils de découpe à fil chaud droit.

IV. Les applications de la découpe à fil chaud de polystyrène

Le découpage à fil chaud trouve de nombreuses applications dans divers domaines en raison de sa capacité à découper avec précision une large gamme de matériaux. Voici quelques-unes des applications potentielles de cette technique :

- Modélisme et maquettes :

Le découpage à fil chaud est largement utilisé dans le modélisme et la fabrication de maquettes pour créer des structures complexes et des détails fins. Il permet de découper des matériaux légers tels que

le polystyrène et le polyuréthane pour construire des modèles réduits d'avions, de bâtiments, de véhicules et d'autres objets.

- Fabrication de prototypes :

Le découpage à fil chaud est utilisé dans le prototypage rapide pour créer des modèles et des prototypes de produits avant la production en série. Il permet de réaliser rapidement des pièces de forme complexe à partir de matériaux légers et peu coûteux.

- Industrie automobile et aérospatiale :

Le découpage à fil chaud est utilisé dans la fabrication de mousses et de matériaux composites pour l'isolation, l'amortissement des vibrations et d'autres applications dans les véhicules automobiles et les aéronefs.

- Industrie du cinéma et du théâtre :

Les décorateurs de cinéma et de théâtre utilisent le découpage à fil chaud pour fabriquer des décors, des costumes et des accessoires. Cette technique permet de créer des éléments de scénographie réalistes et détaillés en utilisant des matériaux tels que le polystyrène expansé et d'autres mousses synthétiques.

- Isolation thermique et acoustique :

Le découpage à fil chaud est utilisé dans l'industrie de la construction pour fabriquer des panneaux isolants thermiques et acoustiques. Il permet de découper précisément des matériaux isolants tels que le polystyrène extrudé et le polyuréthane pour s'adapter aux dimensions spécifiques des bâtiments.

- Enseignes et Lettrages : Découpe de lettres en polystyrène

Idéale pour donner du relief à une enseigne, la découpe de polystyrène permet, de par son imputrescibilité et la haute résistance des pigments employés dans les produits de finition, des applications fiables en intérieur comme en extérieur. La facilité de mise en œuvre de la conception jusqu'à la finition permet d'obtenir un produit fini très attractif, ciblé sur les petits magasins jusqu'aux chaînes de grande distribution.

- Décoration :

Que ce soit pour la décoration d'un stand sur un salon d'exposition, ou bien pour des campagnes promotionnelles d'une chaîne de magasins, la publicité événementielle est une part d'activités importante en découpe de polystyrène. Aussi, l'utilisation de polystyrène découpé pour l'agencement de studios de télévision, ou en décor publicitaire, est de plus en plus employé. Ses caractéristiques de légèreté et de résistance tout à fait en rapport avec le but recherché : facilité et rapidité de mise en œuvre sur un tournage.

- Emballage :

Cette technique est utilisée dans l'industrie de l'emballage pour découper des matériaux d'emballage en mousse, tels que le polystyrène expansé, afin de protéger les produits fragiles pendant le transport et le stockage. En effet, la versatilité du système de découpe à fil chaud permet de résoudre les problèmes de prototypage et de petites - moyennes séries, la mise en œuvre étant extrêmement souple et rapide, comparée à la mise en fabrication d'un moule, par exemple. La qualité de coupe obtenue par fil chauffant est par elle-même excellente, et permet d'obtenir, sans finition

supplémentaire, un emballage technique de très bonne qualité. Pour des produits de haut de gamme, une finition floquée procure à l'emballage un aspect en rapport avec la qualité de son contenu.

- Isolation :

Beaucoup de systèmes d'isolation en polystyrène sont réalisés par le procédé de découpe au fil chaud. L'avantage de ce procédé est sa souplesse d'adaptation à des formes spécifiques, là où le standard commercial de grande série ne peut être utilisé. La réhabilitation de bâtiments industriels utilise ce procédé, qui permet de s'adapter aux formes et contraintes existantes.

- Moules de Fonderie :

La coulée par gravité, principalement de l'aluminium, permet d'obtenir une copie conforme d'une pièce quelconque réalisée en polystyrène. Celle-ci est placée dans un sable spécial, le métal en fusion provoque la fonte du polystyrène et prend la forme exacte de notre pièce.

- Moules à Béton :

Les moules à béton sont de plus en plus employés en construction. Il existe déjà une gamme peu onéreuse de ces moules, disponible pour les applications standard. La facilité de création d'un moule en polystyrène permet de s'adapter à des dimensions sur-mesure, pour un coût de production relativement bas. Les applications peuvent aller d'un simple embellissement de façade jusqu'à des travaux de gros œuvre.

V. Quelles matières à découper à l'aide de ce type des machines

Les machines de découpe par fil chaud peuvent être classées en plusieurs types en fonction de la matière à découper comme suit :

- **Mousse** : elles sont conçues spécifiquement pour découper des mousses, souvent utilisées dans l'industrie du conditionnement, de la fabrication de mousses isolantes.



Figure 1.1 : découpe de mousse [1].

- **Polystyrène Expandé (EPS)** : Spécialisées dans la découpe de polystyrène expansé, ces machines sont couramment utilisées dans la fabrication de modèles architecturaux, de sculptures et de décorations.



Figure 1.2 : Découpe de Polystyrène Expandé (EPS) [2].

- **Polystyrène Extrudé (XPS)** : Conçues pour travailler avec le polystyrène extrudé, ces machines sont utilisées dans la fabrication de panneaux isolants et d'autres applications nécessitant du polystyrène dense.

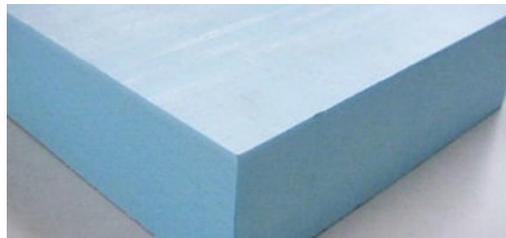


Figure 1.3 : Polystyrène Extrudé (XPS) [3].

- **Mousse Polyuréthane** : Adaptées à la découpe de mousses polyuréthane, ces machines sont utilisées dans des domaines tels que la fabrication de sièges, matelas et autres produits en mousse.



Figure 1.4 : Mousse Polyuréthane [4].

- **Polystyrène Renforcé (RPF)** : Ces machines sont spécifiquement conçues pour travailler avec du polystyrène renforcé de fibres, souvent utilisé dans la construction de prototypes et de modèles

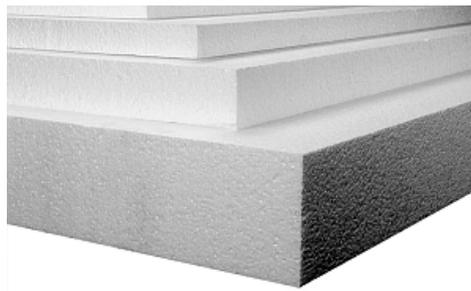


Figure 1.5 : Polystyrène Renforcé [5].

- **Caoutchouc Mousse** : Utilisées dans l'industrie de l'emballage et d'autres applications, ces machines sont spécialisées dans la découpe de caoutchouc mousse.



Figure 1.6 : Caoutchouc Mousse [6].

- **Mousse Rigide** : Conçues pour découper des mousses plus rigides, telles que la mousse de polyéthylène réticulée, ces machines sont utilisées dans diverses applications industrielles.



Figure 1.7 : Mousse Rigide [1].

VI. Conclusion

Ce chapitre a fourni un aperçu général des machines à fil chaud CNC. Nous avons exploré leur principe de fonctionnement et leurs applications dans divers secteurs. Ensuite, nous avons discuté des différents matériaux pouvant être coupés avec une machine à fil chaud CNC, mettant en évidence sa polyvalence et sa précision dans la fabrication moderne.

Ce qu'on a retenu de cet état de l'art est que la découpe par fil chaud est une solution facile d'accès et économique pour la réalisation de tout objet en volume. Le processus de découpe au fil chaud implique de faire passer ce fil chauffé à travers le matériau à découper, créant ainsi une coupe nette et précise. Cette méthode est particulièrement efficace pour découper des matériaux tels que le polystyrène, le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé, le polyuréthane et diverses mousses synthétiques. Elle peut également être utilisée pour découper certains métaux à des températures et vitesses appropriées.

La découpe au fil chaud offre plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes de découpe mécanique. Tout d'abord, elle permet de réaliser des coupes très précises, même dans des matériaux délicats ou fragiles, sans provoquer de fissures ou de déformations excessives. De plus, elle offre une grande flexibilité en termes de formes et de designs, permettant la création de pièces complexes avec des contours précis.

En outre, la découpe au fil chaud produit généralement moins de déchets que d'autres méthodes de découpe, car elle évite les copeaux et les rebuts excessifs. Elle est également relativement rapide et efficace, ce qui en fait une option attrayante pour les applications nécessitant des délais de production rapides.

Chapitre 2 : Analyse technologique des machines de découpage à fil chaud

I. Introduction

La découpe au fil chaud est une technique de découpe qui consiste à faire passer un fil chauffé à travers le matériau pour le couper. Elle est particulièrement adaptée à la découpe de matériaux souples ou fragiles, tels que le polystyrène, le polystyrène extrudé, le polystyrène expansé et d'autres matériaux. En général, les Machines de Découpe au Fil Chaud **MDFC** sont conçues pour offrir une grande précision et une grande flexibilité dans la découpe de ces matériaux. Elles peuvent être utilisées pour réaliser des pièces de toutes formes et de toutes tailles, ce qui en fait un outil très polyvalent. Sur le marché on retrouve différentes machines qui se distinguent principalement par le nombre d'axes utilisés et le mode de coupe utilisé. A travers le présent chapitre, on va faire une analyse technologique de quelques machines pour identifier les éléments communs et identifier les principaux paramètres affectant la découpe à fil chaud.

II. Les modes de découpage à fil chaud

Principalement, on peut distinguer le mode manuel et le mode automatisé. Sur le marché, on peut retrouver différents outils et machines qui peuvent servir à la découpe au fil chaud selon les deux modes comme l'illustre la figure 2.1.



Figure 2.1 : Exemples de MDFC proposées à la vente sur les sites alibaba et amazon.

II.1 Les systèmes de découpage manuels

On peut distinguer deux configurations de coupe manuelle :

- a) *1^{ère} configuration* : la matière à couper est fixe et l'outil se déplace manuellement
- b) *2^{ème} configuration* : l'outil est fixe et la matière à couper se déplace manuellement

Dans la première configuration, le fil chaud est entraîné dans l'espace par le mouvement de la main. Grâce à ses multiples degrés de libertés, la découpe peut se faire dans différentes directions et selon différentes configurations. Donc, le fonctionnement est manuel, le fil est connecté à une source

électrique pour chauffer à la bonne température. La force exercée par la main humaine déclenche le processus de coupe. Cette méthode est utilisée lorsque la précision n'est pas requise car le bras humain manque de précision en matière de stabilisation. Cependant, l'avantage de cet outil est qu'il est peu coûteux et facile à construire, ne nécessitant aucune compétence avancée.



Figure 2.2 : Découpage manuel, 1^{ère} configuration [7].

Dans la deuxième configuration, l'outil est fixe généralement à une table et la matière à couper est déplacée manuellement. La figure 2.2 illustre quelques systèmes de cette classe. La présence de règles et de système de guidage permet des ajustements relativement précis

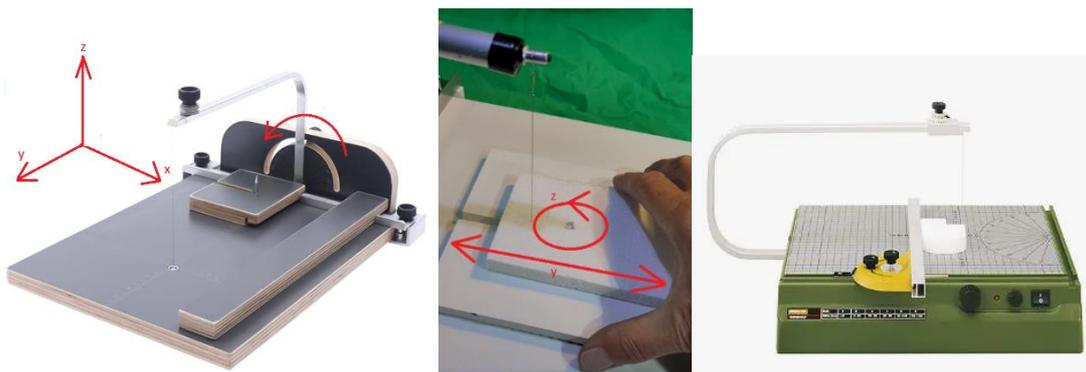


Figure 2.3 : Découpage manuel, 2^{ème} configuration [8], [9].

II.2 Les systèmes de découpe automatisés

Différentes MDFC sont proposées sur le marché, principalement différenciées par le nombre de degrés de liberté (DDL) qu'elles offrent à l'utilisateur ainsi que par leur taille. La découpe est commandée à travers un système CNC « Computer Numerical Control ». La fonction de découpe est déterminée par un programme, elle-même résultant d'un logiciel de pilotage de la machine. Ce logiciel permet de contrôler les mouvements des différents axes de la machine, entre lesquels le fil chaud effectue sa découpe.

Dans un premier temps, on peut distinguer les **MDFC** à un seul degré de liberté (Fig.2.4). Ce degré de liberté peut être de translation (Fig.2.4a et b) comme il peut être de rotation.

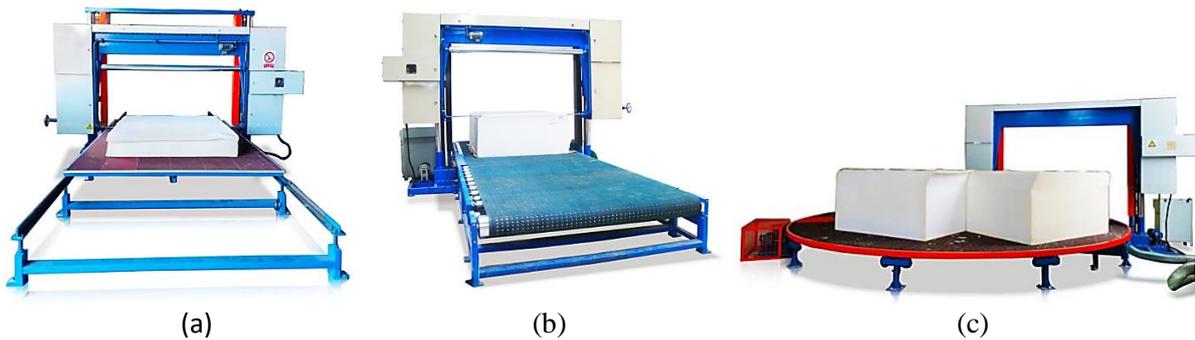


Figure 2.4 : Machines de découpe à un seul degré de liberté proposées par la société zimlin[10]: (a) horizontale, (b) verticale, (c) rotative

Dans un second temps, on peut parler des machines multiaxes (de 2 à 5 axes) pilotées par ordinateur (**Fig.2.5**). Elles sont capables de fabriquer des pièces de géométrie complexe (**fig. 2.5b**) et ayant de grandes dimensions (**fig. 2.5c**).

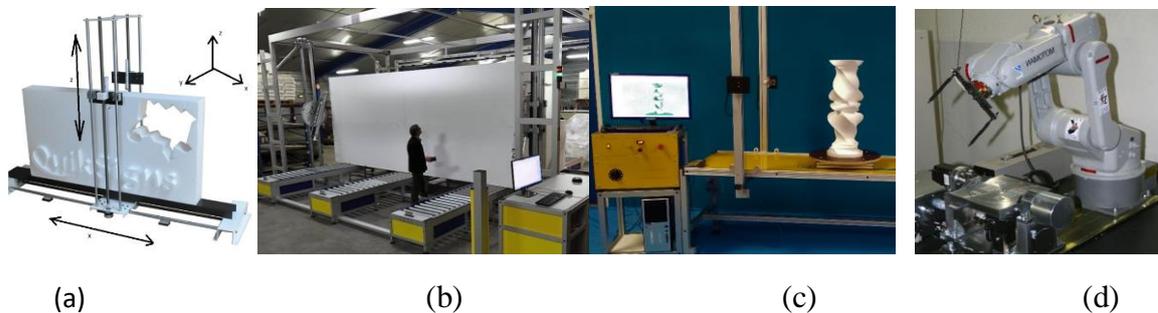


Figure 2.5 : Machines à plusieurs degrés de liberté [11]. (a) à 2 D.D.L., (b) à 3 D.D.L., (c) à 4 D.D.L., (d) à 8 D.D.L.

Par exemple, la **MDFC** de la figure 2.5(a), est une machine à deux degrés de liberté qui permet de positionner le fil chaud perpendiculairement à un plan. Ainsi la découpe des pièces 2D telles que des lettres est très facile. En outre, les machines à 3 D.D.L. sont largement utilisées dans l'industrie en raison de leur précision dans la découpe de diverses formes. En générale, les **MDFC** multiaxes sont dotées de moteurs pas à pas et elles sont pilotées par un système CFAO adapté.

III. Architecture d'une machine de découpage par fil chaud à commande numérique

L'analyse des architectures des MDFC existantes sur le marché indique qu'elles comprennent essentiellement deux parties :

- Une partie opérative
- Une partie commande

Ces deux parties travaillent ensemble pour fabriquer des pièces 3D à partir de matière première présentée sous forme de blocs.

III.1 Partie opérative :

La partie opérative d'une machine de découpe par fil chaud CNC comprend plusieurs composants essentiels qui travaillent ensemble pour réaliser le processus de découpe. Voici une description générale de ces composants :

- Table de Travail : C'est la surface sur laquelle le matériau à découper est placé. La table de travail doit être stable et plane pour assurer une découpe précise.

- **Fil Chaud** : Le fil chauffé est généralement en nickel-titane ou en acier inoxydable. Il est chauffé à une température élevée à l'aide d'une source d'énergie électrique, ce qui lui permet de fondre et de découper le matériau lorsqu'il entre en contact avec lui.
- **Guide de Fil** : Il s'agit d'un système de guidage qui maintient le fil dans une trajectoire précise pendant le processus de découpe. Ce guide peut être mobile selon les axes X, Y et Z pour permettre la découpe dans différentes directions.
- **Moteurs et Rails** : Des moteurs pas à pas ou des moteurs servo sont utilisés pour déplacer le fil chauffé le long des axes X, Y et Z. Des rails guident ces mouvements, assurant une découpe précise selon les coordonnées programmées.
- **Alimentation électrique** : Fournit l'énergie nécessaire pour chauffer le fil. La température du fil doit être soigneusement contrôlée pour assurer une découpe efficace.

III.2 Partie commande

La partie de commande d'une machine de découpe par fil chaud CNC est cruciale pour son fonctionnement. Elle englobe plusieurs éléments permettant la programmation, le contrôle et la gestion de la découpe. Voici les composants clés de la partie de commande :

- **Logiciel de CAO** : Les opérateurs utilisent un logiciel de CAO pour créer des modèles 2D ou 3D des pièces qu'ils souhaitent découper. Ces modèles sont ensuite convertis en programmes de commande numérique (G-code) qui contiennent les instructions spécifiques pour la machine.
- **Post processeur** : Le G-code généré par le logiciel de CAO peut nécessiter des ajustements pour être compatible avec la machine de découpe spécifique.
- **Contrôleur CNC** : C'est l'unité centrale qui interprète les instructions du G-code et les traduit en mouvements précis de la tête de coupe. Le contrôleur CNC gère les moteurs pas à pas ou les servomoteurs responsables du déplacement du fil chaud le long des axes X, Y et Z.
- **Interface Utilisateur** : Les opérateurs interagissent avec la machine via une interface utilisateur conviviale. Cette interface peut inclure un écran tactile ou un ordinateur connecté au contrôleur CNC, permettant de charger les programmes, de surveiller le progrès de la découpe et d'effectuer des ajustements si nécessaires.
- **Système de Réglage des Paramètres** : La machine peut nécessiter des ajustements pour s'adapter à différents matériaux ou épaisseurs. Un système de réglage des paramètres permet à l'opérateur de définir des variables telles que la vitesse de coupe, la température du fil et d'autres paramètres spécifiques à la tâche.
- **Unité d'Alimentation** : Cette unité fournit l'énergie nécessaire pour chauffer le fil chaud. Elle doit être capable de maintenir une température constante et contrôlée pour assurer une découpe efficace.
- **Stockage de Programme** : Les programmes de découpe créés à l'aide du logiciel de CAO sont stockés dans la mémoire de la machine. Cela permet de rappeler facilement les programmes précédemment utilisés et d'automatiser le processus de découpe.

IV. Paramètres du procédé de découpage

Les mousses plastiques sont le plus souvent découpées à l'aide de fils chauds qui sont maintenus droits pour produire des surfaces lisses et des coupes de profil en 2D, et de rubans chauds qui peuvent être pliés dans n'importe quel profil et utilisés pour découper des sections tournantes et des surfaces complexes [12]. Bien que presque toutes les mousses plastiques puissent être découpées avec des fils chauds, les matériaux les plus couramment découpés sont les mousses rigides telles que les mousses EPS, XPS, polyuréthane (PU), polychlorure de vinyle (PVC) et polyéthylène (PE). Idéalement, la température de l'élément de coupe doit être suffisante pour faire « fondre » ou ramollir suffisamment la mousse juste avant le fil ou le ruban.

Les mécanismes thermomécaniques présents dans le processus de découpe peuvent être séparés en 3 modes de coupe principaux et les transitions entre eux. Ces modes sont les suivants :

- La découpe thermique dans laquelle la mousse est fondue ou « vaporisée » devant la source de chaleur qui avance ;
- La découpe thermomécanique dans laquelle l'élément de coupe entre en contact avec la mousse et coupe donc par une combinaison de fusion et de cisaillement, et ;
- La découpe mécanique qui se produit lorsque la température du fil est trop basse par rapport à la vitesse d'avance ou vice-versa.

La saignée est un terme courant dans le domaine de la fabrication et se définit comme la fente ou la rainure réalisée par un outil de coupe. La largeur du trait de scie dépend du mode de coupe utilisé, comme le montre la figure 2.6 ci-dessous.

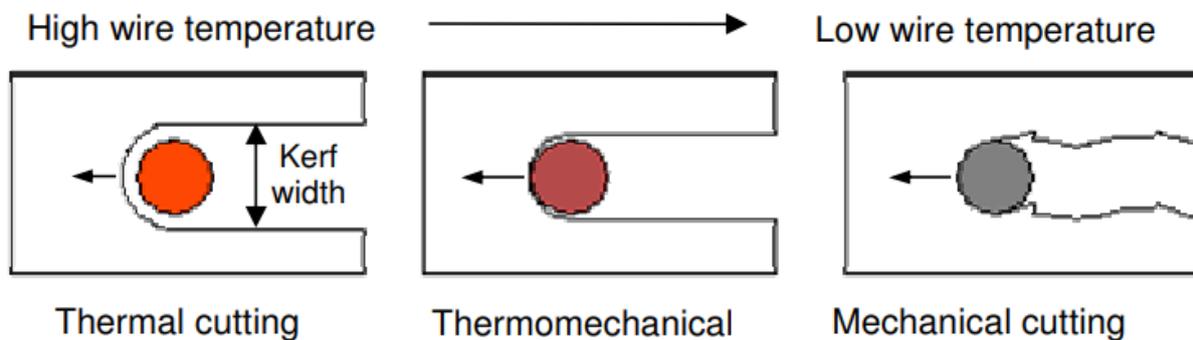


Figure 2.6 : les mécanismes de coupe [12].

Le découpage mécanique produit des surfaces déchirées ou déchiquetées qui sont souvent inacceptables à des fins de fabrication et ne sont donc incluses que par souci d'exhaustivité. Souvent, au fur et à mesure qu'une coupe progresse dans le temps, le mode de coupe passe de la coupe thermique à la coupe thermomécanique ou mécanique, avec une zone de transition entre les deux. Selon les conditions de coupe, la zone de transition peut être courte (20 mm) ou s'étendre sur toute la longueur de la coupe.

Dans des conditions de coupe correctes, la coupe thermomécanique offre la finition de surface la plus lisse tout en conservant une faible largeur de trait de scie, mais les forces de coupe élevées peuvent être un facteur limitant pour obtenir des vitesses d'avance élevées. La découpe thermique produit des surfaces texturées avec de grandes largeurs de trait de scie. La vitesse d'avance maximale réalisable avec la découpe thermique dépend des propriétés du matériau de l'outil de découpe, qui est généralement un alliage métallique.

D'une façon générale, plusieurs paramètres peuvent affecter la mise en œuvre d'un procédé de découpage à fil chaud des mousses plastiques ou du polystyrène. Ce qui rend difficile la maîtrise de ce procédé. D'ailleurs les informations sur cette problématique sont rares et proviennent seulement des expériences empiriques qui font appel à des nombreux essais en jouant sur ces paramètres soit d'une façon indépendante ou dépendante. Dans ce qui suit, on va définir les principaux paramètres qui influent sur la qualité de coupe et on va voir les interrelations qui existent entre eux. La figure 2.6 résume les paramètres affectant la découpe des mousses plastiques.

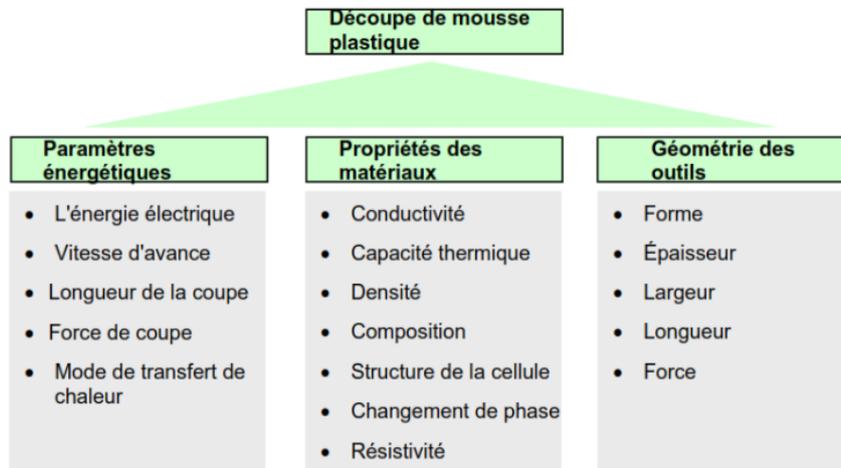


Figure 2.7 : Principaux paramètres affectant la qualité de découpe dans les mousses plastiques.

IV.1 Paramètres énergétiques

Le découpage des mousses plastique est associé au transfert de la chaleur, qui est générée dans l'outil de coupe, vers la mousse plastique à découper. La chaleur transférée dans la mousse est limitée aux trois modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement [13]. Il a été démontré que les principaux facteurs impliqués dans le transfert de chaleur sont les propriétés d'absorption d'énergie du matériau de la mousse, la puissance électrique mise en jeu et la vitesse d'avance du fil. a. Energie électrique et chaleur effective La chaleur est créée dans l'outil de coupe en faisant passer un courant électrique à travers un métal résistif (effet Joule).

IV.2 Propriétés des matériaux

IV.2.1 Mousses plastiques

Les mousses plastiques se présentent sous une large gamme de compositions chimiques, de densités et de structures cellulaires différentes. Cette dernière affecte directement le comportement des mousses plastiques durant la coupe [10]. Ce comportement par rapport à l'augmentation de la température du fil mise en jeu constitue le cœur de l'étude de la mécanique de découpe de la mousse plastique. Et donc, pour un meilleur découpage d'une mousse plastique, il est important de savoir comment les propriétés thermiques de cette mousse changent avec la température et aussi quelles températures provoquent les différentes transitions physiques présentes dans la découpe de la mousse. La plupart des groupes de recherche sur le découpage des mousses plastiques adoptent les valeurs des propriétés des matériaux tirés de la littérature, en utilisant souvent des valeurs inappropriées et en simplifiant beaucoup trop les caractéristiques des matériaux.

IV.2.2 Les outils de coupes

Le matériau de l'outil de coupe influence le processus de coupe de plusieurs façons. Le matériau détermine le comportement électrique de l'outil de coupe, il influence la résistance et la stabilité de la forme de l'outil de coupe et il influence directement le transfert de chaleur par rayonnement lié à l'émissivité de la surface. Le matériau idéal pour un outil de coupe doit avoir une résistance spécifique élevée, une résistance à haute température et de bonnes propriétés de fluage.

Les alliages de Titane ont une résistivité élevée, ce qui permet au matériau de répondre rapidement aux changements de puissance électrique [14]. Ils ont également une bonne résistance à haute température. En raison de son coût élevé, le titane n'est pas très utilisé. Différents matériaux sont utilisés pour la fabrication des fils chauffants ; les plus utilisés sont les alliages de nickel en raison de leur coût relativement faible, de leur résistance spécifique élevée et de leur résistance à haute

température. Les aciers alliés peuvent également être utilisés dans des applications bas de gamme où les fils peuvent être plus courts et les températures de coupe moins élevées.

IV.3 Géométrie de l'outil

Les machines de découpage des mousses plastiques existants sur le marché utilisent différents types d'outils de coupes entre autres : des rubans ou des fils chauffants. La géométrie de l'outil influencera le processus de coupe de plusieurs façons, notamment la stabilité de la forme, la taille de la coupe, la forme de la coupe, le modèle de rayonnement et les trajectoires de l'outil [12].

La forme de la section transversale ainsi que le matériau de l'outil déterminent la rigidité et le comportement de la flexion de l'outil (fil, ruban, lame). Cela est important pour résister aux forces de coupe normales, mais aussi au flambage et à la torsion. On peut intuitivement penser que des sections différentes présentent des coupes différentes et produisent des qualités de surface différentes. Le contrôle de la trajectoire et de la pointe de l'outil peut également être influencé par la section de l'outil, par exemple un outil à section circulaire peut couper dans toutes les directions alors qu'un outil rectangulaire est le mieux adapté pour couper perpendiculairement à la section transversale.

Le mode de rayonnement thermique de l'outil est aussi important, il est déterminé non seulement par le matériau dont il est fait et sa couleur, mais aussi par la forme géométrique de l'outil de coupe, En cas de températures élevées, on peut s'attendre à ce que cela ait un impact sur le comportement de coupe de l'outil. Il peut être possible de concevoir un outil de telle sorte que le bord de coupe dissipe le plus d'énergie, optimisant ainsi le comportement de coupe [12].

Par ailleurs, la valeur de l'effort de coupe affecte directement la finition de la surface coupée. Des apports de chaleur efficaces élevés entraînent des coupes sans force, ce qui conduit à des larges coupes importantes, tandis qu'un faible apport de chaleur efficace entraîne des coupes à force élevée qui peuvent casser ou plier l'outil de coupe. Les finitions de surface optimales (surfaces à faible rugosité) sont obtenues en utilisant une chaleur efficace de telle sorte que la force de coupe soit une valeur faible non nulle. C'est la condition dans laquelle la force de coupe est juste assez chaud pour faire fondre la mousse adjacente sans augmenter la largeur de coupe. La puissance mécanique communiquée à la pièce par les outils de découpage des mousses plastiques peut être calculée en multipliant l'effort de coupe par la vitesse de coupe. Cette valeur est généralement très faible par rapport à l'énergie thermique (< 1%), car les efforts de coupe sont généralement faibles.

V. Les solutions technologiques

L'analyse des mécanismes de différentes machines proposées sur le marché et particulièrement celles développées par les clubs de modélisme, nous a permis d'identifier un ensemble de solutions technologiques communément déployées sur ces machines, entre autres :

- **Vis à billes** : le système vis à billes permet de transformer un mouvement de rotation a un mouvement de translation en combinant les mouvement d'une vis et d'une bille.



Figure 2.8 : système vis-écrou utilisant des vis à billes trapézoïdale [15][16].

- **Tige en acier** : le rôle de tige est de guider l'ensemble d'écrou et le support de fil à l'aide de vis et moteur selon axe de z



Figure 2.9 : tige de guidage en acier [16].

- **Actionneurs :** Les actionneurs sont l'un des composants de base de toute machine de découpe à fil chaud. Ils sont chargés d'effectuer les mouvements nécessaires pour positionner le câble de découpe. Les moteurs couramment utilisés sont des moteurs pas à pas, les types les plus courants étant NEMA 17 et NEMA 23 (voir Fig.2.9)



Figure 2.10 : Moteur pas à pas de type Nema [17].

- **Guidages linéaires :** les guidages linéaires à base d'éléments roulants présentent des avantages comparables à ceux des roulements pour mouvements de rotation. Les douilles à billes conviennent pour n'importe quelle longueur de course. Par contre, elles n'admettent pas les mouvements de rotation

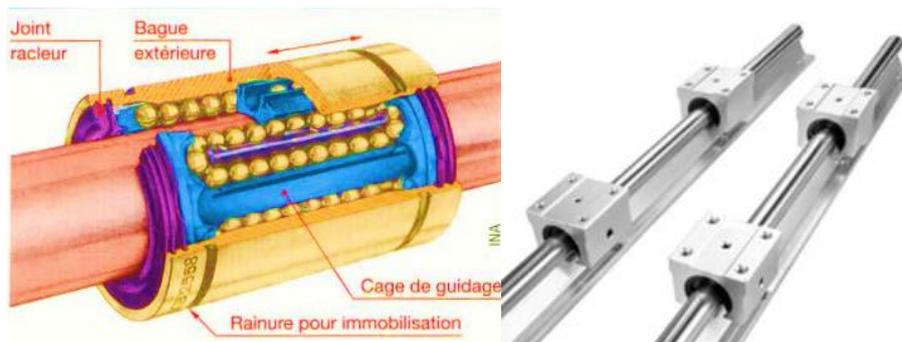


Figure 2.11 : Roulement douilles à billes [18] [19].

Par ailleurs, il existe une autre méthode de guidage moins onéreuse, elle consiste à utiliser des rails de guidage de menuiserie au lieu des tiges. La figure 2.11 illustre des conceptions utilisant ce type de solution.

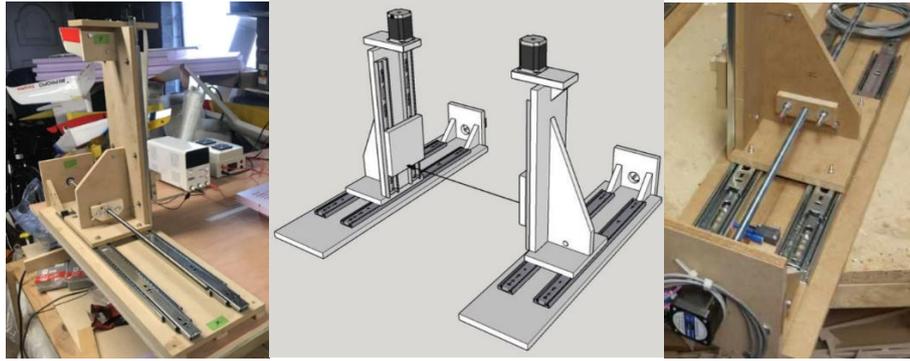


Figure 2.12 : système de guidage [14].

- **Système Poulie/courroie** : Le système de transmission de puissance à base de poulies et courroies est utilisé sur certaines machines de découpe. Il est utilisé dans le cas où on veut transmettre un mouvement de rotation à une distance plus ou moins importante. Cependant, on a besoin souvent d'un tendeur.



Figure 2.13 : système poulie courroie [20] [21].

- **Systèmes de guidage à galets** : c'est système comportant un chariot ayant plusieurs galets et permet le guidage le long d'un rail en alliage léger. Par rapport aux autres systèmes de guidage linéaire, ce système à galets est moins sensible aux blocages dus à une pollution externe.



Figure 2.14 : Système de guidage a galets [16].

VI. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons fourni un aperçu plus détaillé des machines de découpe à fil chaud. En effet, nous avons exploré les différentes architectures de MDFC existantes et étudié de près le principe de coupe. Ceci nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement et les différentes solutions technologiques utilisées. Sur la base de ces acquis, nous allons aborder dans le prochain chapitre, la conception de notre MDFC à quatre axes.

Chapitre 3 : Conception d'une machine de découpage à quatre axes

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la conception de notre Machine de découpage à fil chaud **MDFC** à pilotage numérique (**CNC**) ayant quatre axes. Nous allons ainsi décrire notre approche de conception, en commençant par la définition du cahier des charges. Ensuite, nous allons décrire les solutions technologiques que nous prévoyons d'employer. Enfin, nous discuterons le dimensionnement des principaux composants.

Le cahier des Charges regroupe les spécifications et les exigences désirées de la future **MDFC-CNC** qui guideront nos développements. Ce document sert comme plan de travail, détaillant les critères fonctionnels, de performance et opérationnels que notre système doit respecter.

Différentes solutions technologiques seront ensuite explorées en vue de les utiliser dans la construction de notre machine. Cela inclut la sélection des composants matériels appropriés, tels que les moteurs pas à pas, les guides linéaires et les éléments chauffants, et la commande des mouvements.

Nous définirons également les dimensions et les spécifications des principales pièces de notre **MDFC-CNC**, telles que le cadre, le mécanisme de tension du fil, le système de guidage du fil et la table de découpe. Le bon choix de ces dimensions sont essentielles pour assurer l'intégrité structurelle, un contrôle précis du mouvement et des performances de découpe optimales.

En abordant ces aspects dans ce chapitre, nous établissons notre feuille de route de conception claire et précise pour le développement de notre machine, jetant ainsi des bases solides pour les phases ultérieures de fabrication et de test.

II. Cahier des charges

L'objectif de notre projet de fin d'études est de mettre en œuvre une **MDFC-CNC à quatre axes**. D'une façon générale, le cahier des charges décrit les spécifications du produit ciblé de point de vue technique, économique et opérationnel. Il exprime ainsi les exigences escomptées de notre machine en termes de fonctions principales et partielles, de spécifications techniques et économiques.

II.1 Fonction principale

La fonction essentielle de notre machine est de pouvoir découper avec précision des blocs de mousse en matériaux légers tels que le polystyrène expansé (**EPS**), la mousse de polyuréthane.

II.2 Fonction partielles

Il y en a plusieurs fonctions partielles, entre autres :

- Guidage linéaire selon les axes (X, Z).
- Variation de la posture du fil de découpe suivant quatre axes différents.
- Réglage de la température du fil chaud
- System de fixation des blocs de la mousse à découper.
- Pilotage automatique à base d'une commande numérique.

II.3 Spécifications techniques

Nous avons retenu les spécifications suivantes :

- Zone de travail : Minimum de 800mm x 440mm x 350mm
- Précision de positionnement : ± 0.5 mm
- Vitesse de coupe : 0 - 2500mm/min
- Alimentation : 200V, 50Hz

II.4 Spécifications économiques

- Coût réduit au maximum
- Utilisation de pièces disponibles au niveau de notre laboratoire ou sur le marché local

II.5 Spécification opérationnelles

- Montage et démarrage faciles
- Manipulation facile
- Maintenance facile

III. Analyse fonctionnelle

III.1 Etude de besoin

Lorsqu'une entreprise (ou un bureau d'étude) décide de lancer un nouveau produit ou service, il est capital pour elle de définir les besoins de ses futurs clients. Pour cela, la bête à cornes représente l'outil d'analyse parfait afin d'analyser les besoins de sa cible et également pour déterminer la direction à suivre dans son projet. Le diagramme bête à cornes est un diagramme représenté sous forme de graphique qui permet de savoir si un produit ou service répond réellement aux besoins des utilisateurs. Elle est appelée bête à cornes, car elle ressemble à une tête de taureau avec la ligne reliant les deux bulles en haut du diagramme. Ce diagramme regroupe les réponses aux questions du **Tableau 3.1**.

Tableau 3-1 : Tableau questions/réponse relatif au besoin.

Questions	Réponse
1) A qui le produit rend-il service ?	opérateur
2) Sur quoi le produit agit-il ?	Pièce brute (Bloc de mousse)
3) Dans quel but ?	Découpe effective

La **figure 3.1** représente le diagramme bête à cornes relatif au produit **MDFC** qui est une machine CNC de découpe à fil chaud pilotée par ordinateur.

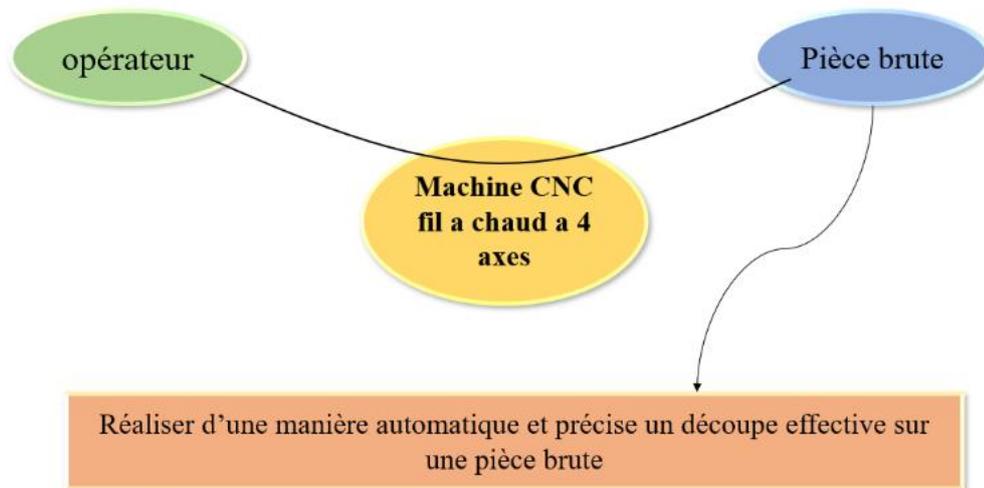


Figure 3.1 : Diagramme tête à cornes d'une MDFC.

III.2 Analyse fonctionnelle externe

La conception de produits et de services requiert une démarche rigoureuse pour aboutir à un résultat en phase avec les besoins d'un client interne ou externe. Une des clés est de traduire ses exigences en termes de fonctions. L'analyse fonctionnelle externe AFE apporte une méthodologie pour mener cette analyse. L'AFE est une méthode visant la satisfaction du besoin exact de l'utilisateur et s'appuie sur 3 principes :

- Pour satisfaire le besoin, il faut le connaître
- Pour le comprendre, il faut l'exprimer en termes de fonctions
- Pour identifier les fonctions, il est nécessaire d'utiliser une méthode d'analyse

L'AFE concerne l'expression fonctionnelle du besoin tel qu'exprimé par le client utilisateur du produit : il s'agit de mettre en évidence les fonctions de service ou d'estime du produit étudié. Le produit est considéré comme une « boîte noire » et ne fait pas partie de l'analyse. Cependant les fonctions qui sont produites par cette « boîte noire » doivent être minutieusement étudiées : il s'agit d'en faire l'inventaire, de les décrire et de les évaluer.

Suite à une analyse approfondie, nous avons identifié les principaux éléments du contexte externe du produit visé, ainsi que les différentes fonctions de service attendues. Ces éléments sont synthétisés dans le diagramme pieuvre présenté dans la figure 3.2. La fonction principale du produit en question consiste à permettre à un opérateur d'effectuer automatiquement une découpe précise sur une pièce brute. Les diverses fonctions de service sont succinctement décrites dans le tableau 3.2.

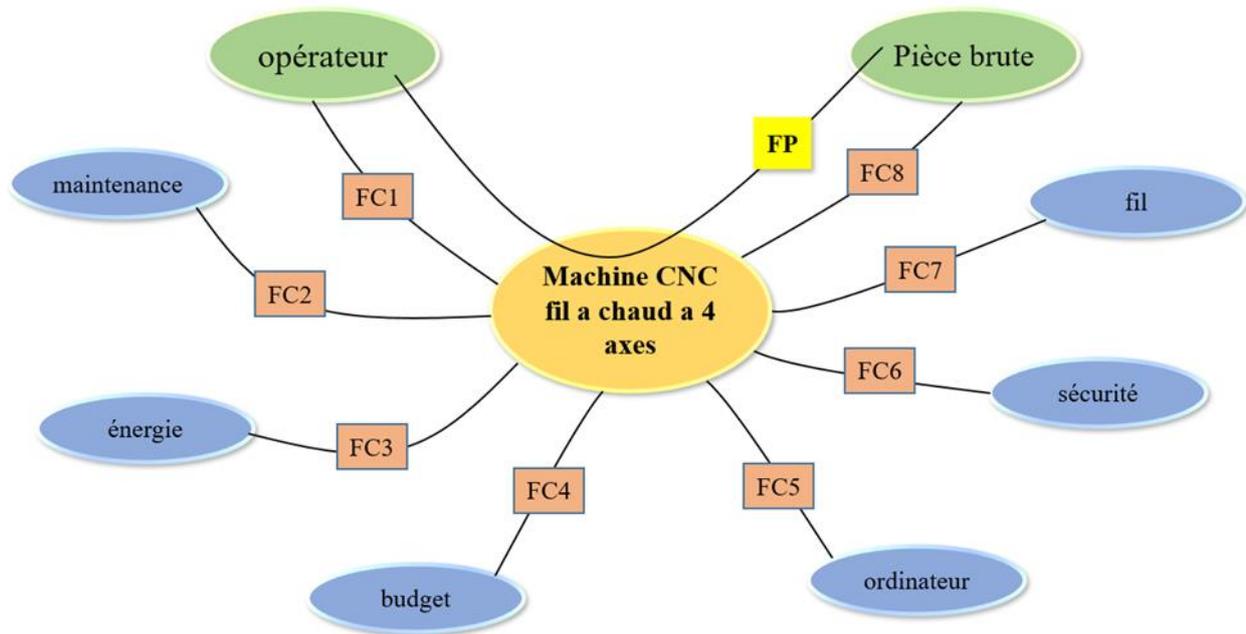


Figure 3.2 : Diagramme pieuvre

Tableau 3-2: fonctions de service..

FP	Réaliser des opérations découpage avec précision sur des pièces brute de différent taille
FC1	Etre facile à utiliser et à déplacer
FC2	Permettre une maintenance périodique aisée
FC3	S'adapter au réseau électrique domestique
FC4	Prix raisonnable
FC5	Utiliser les logiciels de CFAO pour la programmation en Code G
FC6	Respecter les normes de sécurité
FC7	Echauffement de fil pour découpe la pièce
FC8	Subir les efforts de coupe

III.3 Analyse fonctionnelle interne

L'Analyse Fonctionnelle Interne AFI établit la perspective du concepteur chargé de développer le produit afin de répondre aux besoins exprimés. Cette approche dépasse la simple considération du système comme une boîte noire ; au contraire, elle se concentre sur l'examen de son fonctionnement interne pour comprendre ses mécanismes.

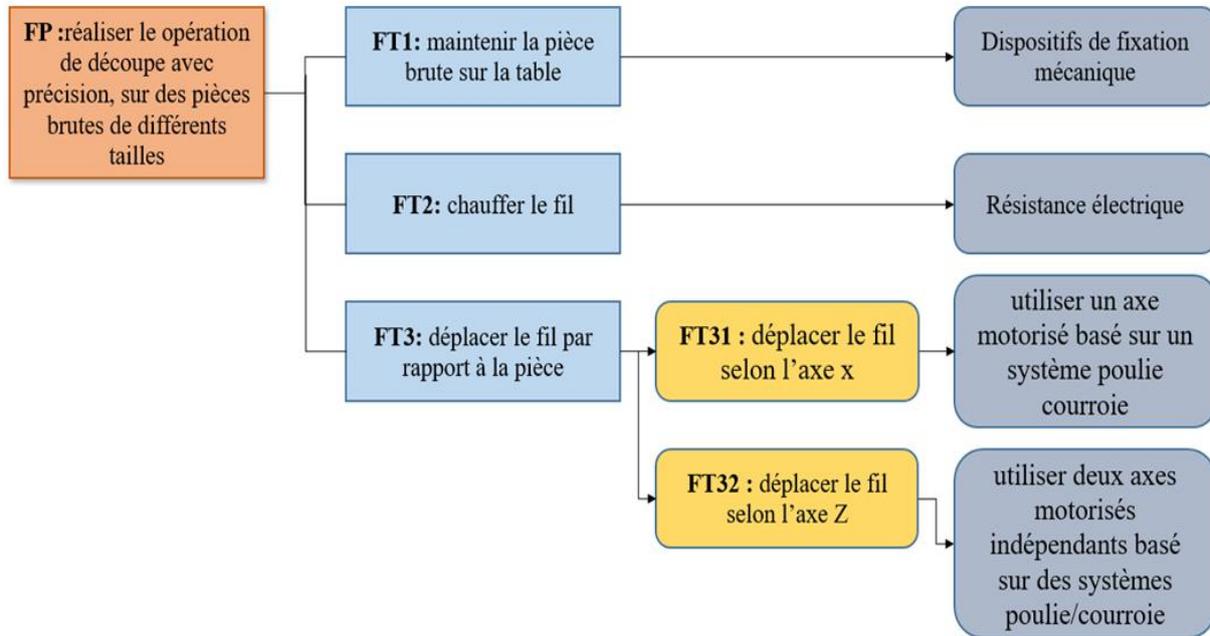


Figure 3.3 : Diagramme FAST.

Le système est conceptualisé comme une composition d'éléments, chacun remplissant des fonctions spécifiques par rapport aux autres. L'analyse fonctionnelle interne met en lumière ces fonctions techniques en utilisant diverses techniques, dont le diagramme FAST (Fonction Analyse Système Technique). Ce diagramme permet de traduire chaque fonction de service en fonctions techniques, puis en solutions techniques concrètes. Le diagramme FAST pour la fonction principale, "réaliser l'opération de découpe avec précision, sur des pièces brutes de différents tailles", est illustré dans la figure 3.3. La fonction "FT31 : déplacer le fil selon l'axe de X " peut être encore décomposée davantage, comme indiqué dans la figure 3.4.

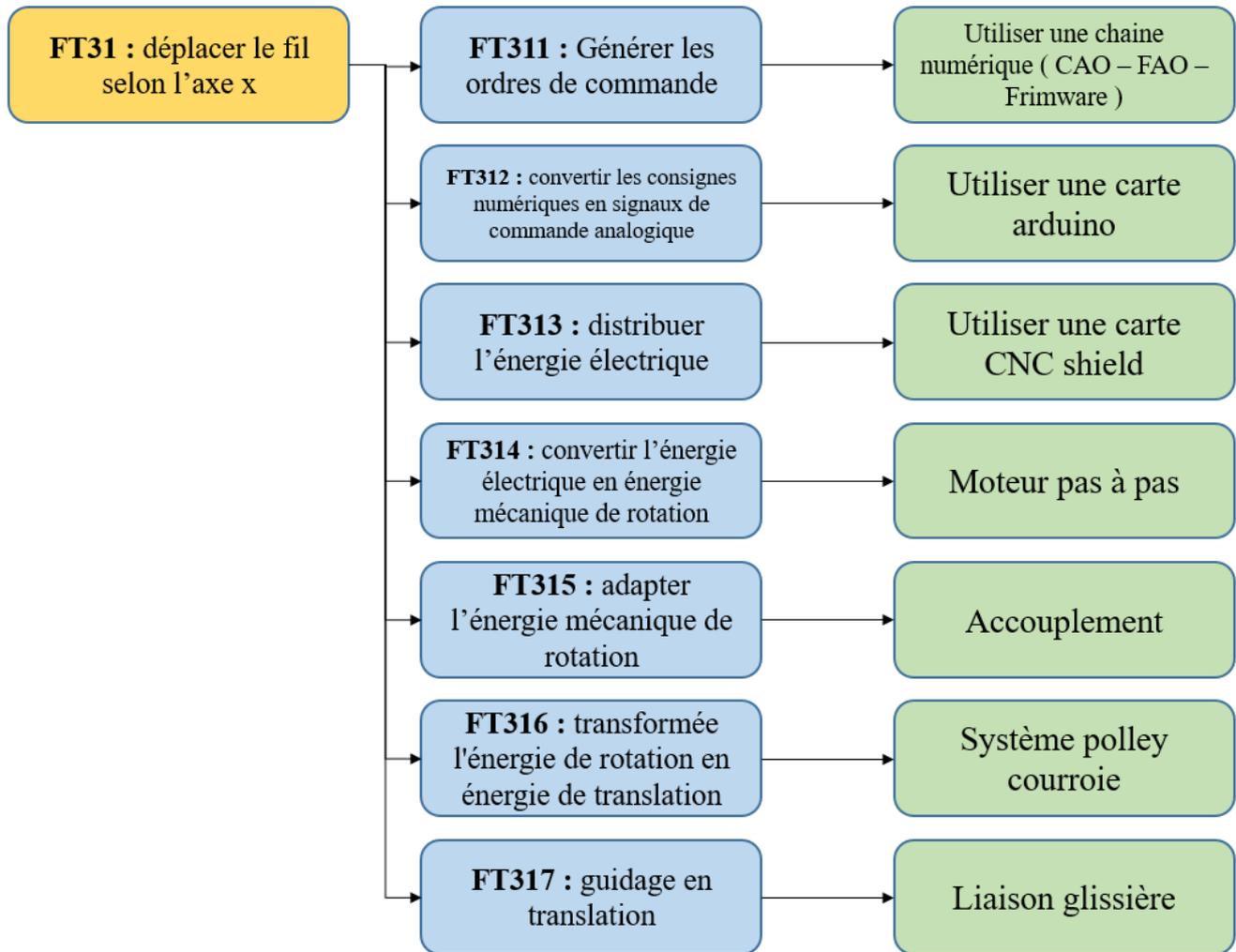


Figure 3.4 : Diagramme FAST de la fonction FT31.

IV. Architecture et conception de notre MDFC-CNC

Sur la base de l'analyse fonctionnelle précédente, on peut imaginer une architecture globale de notre machine comme illustré sur la figure 3.5. Nous retrouvons plusieurs éléments sur ce schéma :

- La carte de contrôle CNC,
- La carte de puissance : elle permet de commander des moteurs avec plus de couple (pour les grosses machines) ou de types différents (moteur bipolaire / moteur unipolaire).
- Les moteurs qui actionnent la machine,
- Un module de chauffe pour commander la température du fil chaud,
- Le fil chaud,
- Un adaptateur USB si votre PC n'a pas de port parallèle (la plupart des cartes de contrôle disponibles sur internet n'ont pas de prise USB),

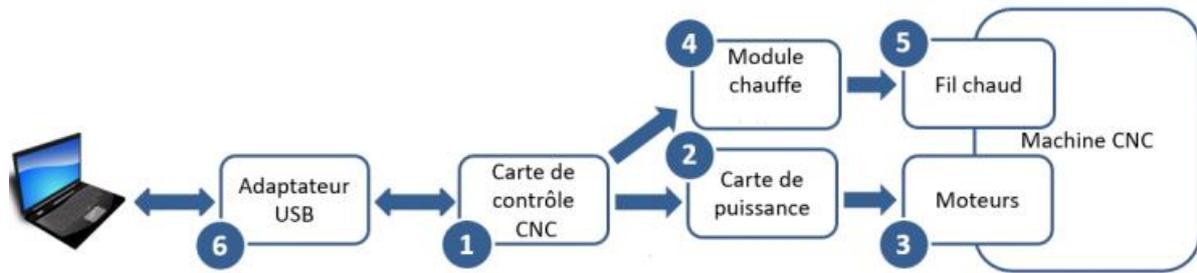


Figure 3.5 : Architecture globale de la MDFC.

En ce qui concerne la cinématique de la machine, pour effectuer la découpe de la pièce brute, l'outil de coupe qui est le fil chaud doit avoir, au moins, deux déplacements en translation suivant les deux axes horizontale et verticale, plus une rotation qui sera attribuée à la pièce brute. Ainsi nous retenons le schéma cinématique de base de la **figure 3.6**.

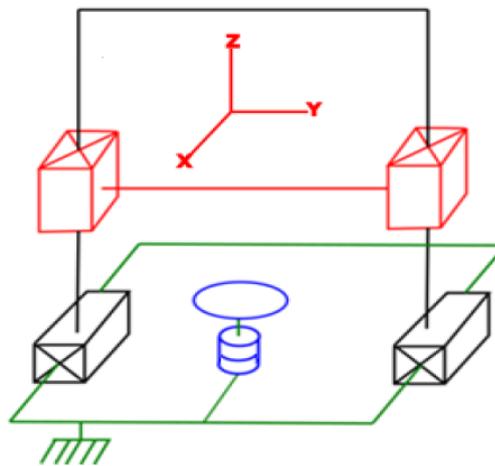


Figure 3.6 : Schéma cinématique de la MDFC.

IV.1 Solution technologiques

L'architecture générale de notre MDFC peut être mise en œuvre, techniquement, de différentes façons. Tout dépend des moyens disponibles et du temps alloué à la réalisation. Dans cette section, nous présenterons quelques solutions technologiques qu'on a étudiées, la solution finale retenue est la synthèse de plusieurs idées testées pratiquement.

Le modèle retenu est celui illustré par la figure 3.7 qui reprend les liaisons cinématiques de la figure 3.6. Il présente les caractéristiques suivantes.

- Nous disposons d'une table rotative selon l'axe Z, qui est considérée comme indépendante des mouvements de translation selon les axes X et Z.
- Le fil est attaché, via deux pièces intermédiaires, à deux axes indépendants parallèles à Z, comme ça on peut avoir une découpe inclinée (rotation autour de X).
- Pour la translation le long de X on a deux liaisons prismatiques horizontales, elles sont actionnées par un seul moteur.
- La structure de base de la machine est réalisée à l'aide de profilé d'aluminium pour assurer légèreté et rigidité

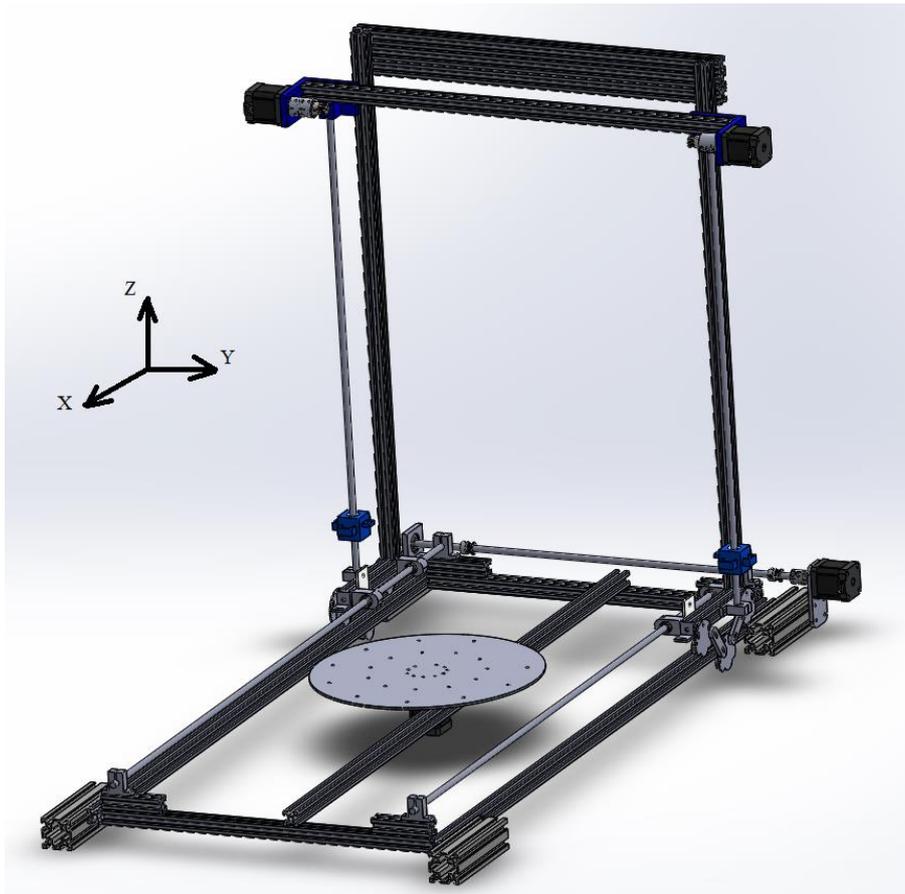


Figure 3.7 : Modelé CAO-3D de la MDFC-CNC.

IV.1.1 Sous-système de déplacement le long de x

La longueur de l'axe X est de 1000mm avec un entraxe de 1045.8mm. Pour ce système d'axe, nous avons opté pour la technologie de la courroie Polly et avons intégré un moteur Nema 17.

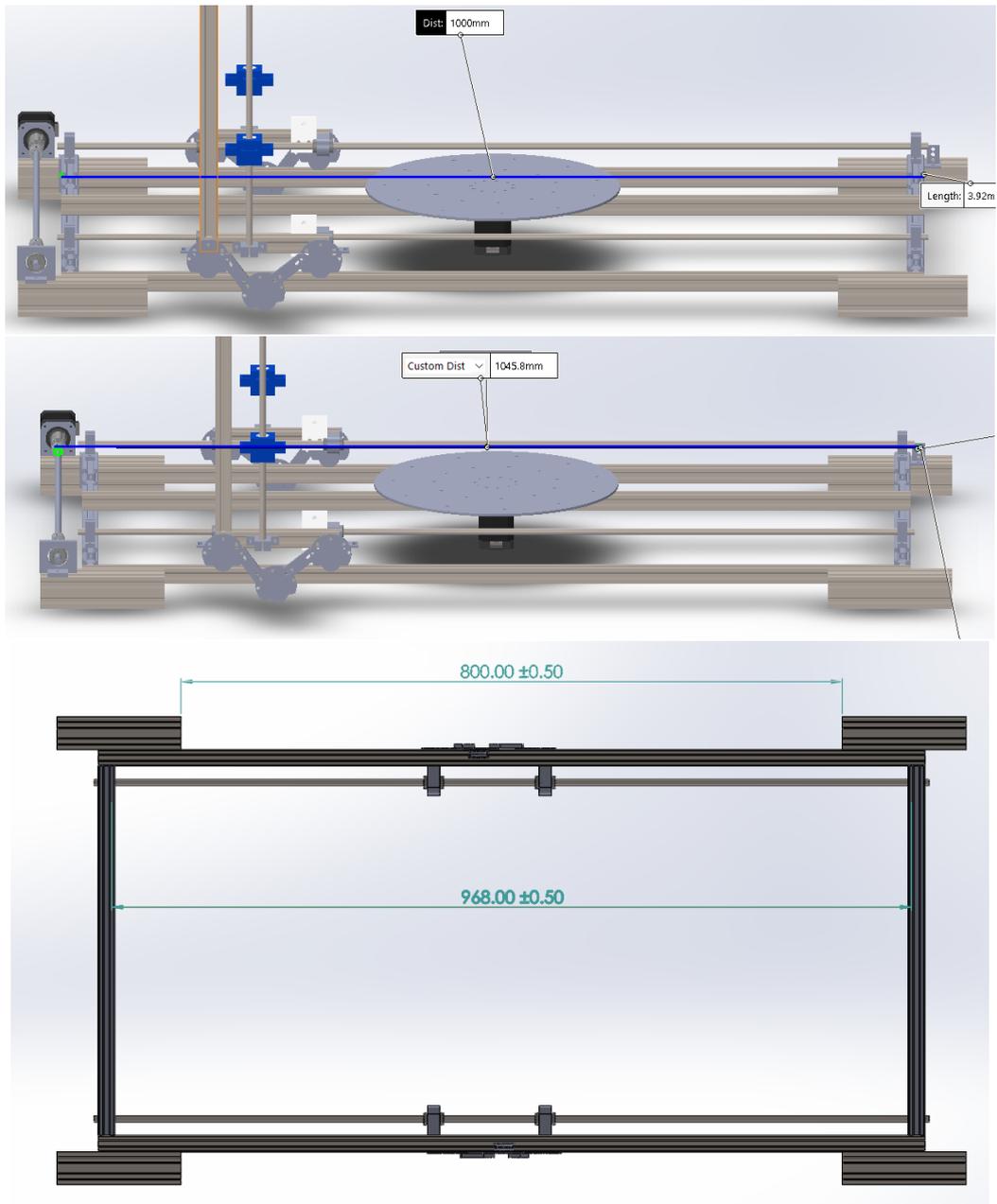


Figure 3.8 : Dimensionnement de l'axe X.

La partie de travail effective le long de l'axe X est de 800mm comme il est illustrée dans la figure 3.8.

La figure 3.9 illustre l'assemblage de l'axe X avec la nomenclature des pièces.

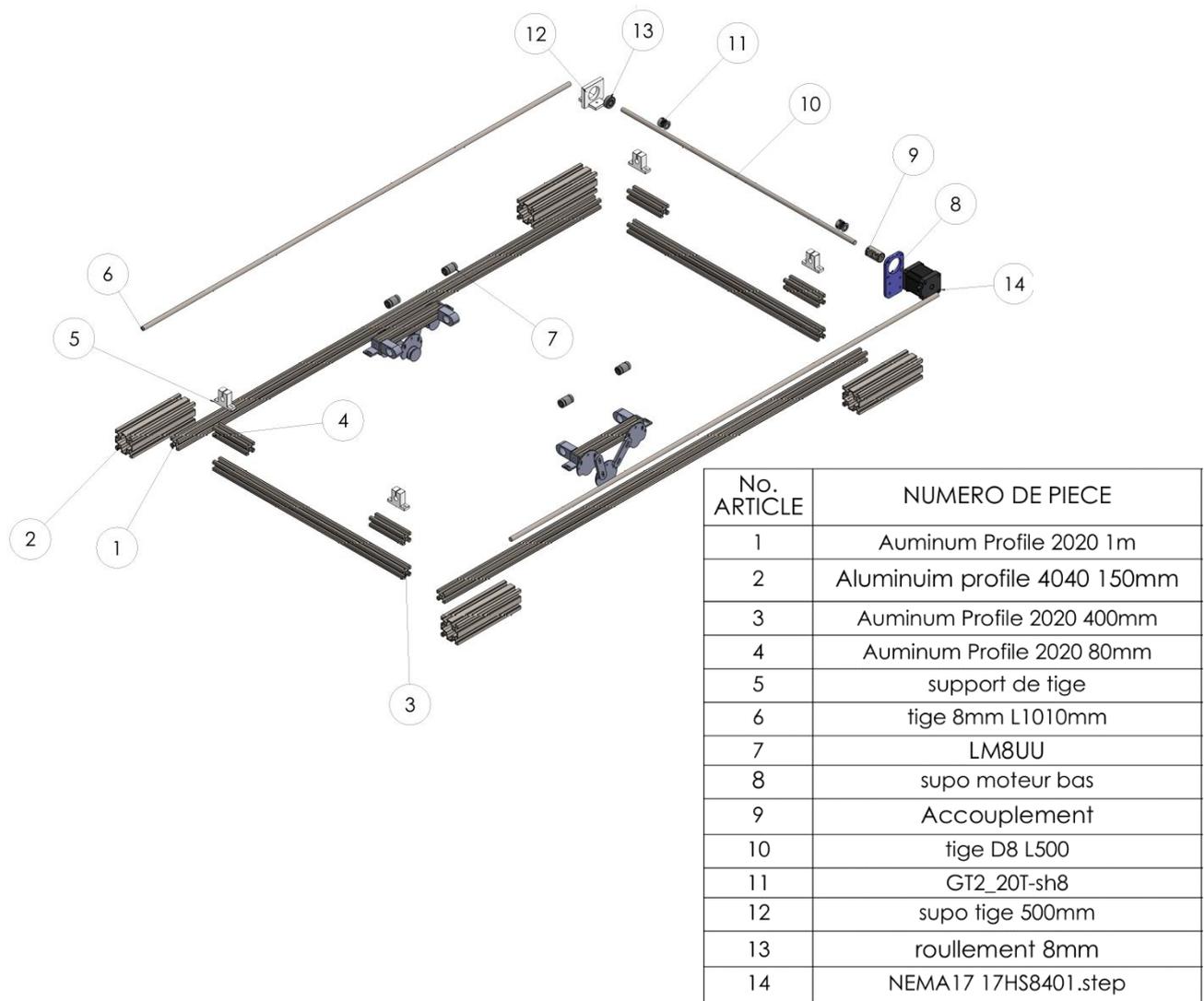


Figure 3.9 : Nomenclatures des pièces (axe x).

IV.1.2 Sous-système de déplacement le long de z

La figure 3.10 illustre le sous-système responsable du déplacement le long de l'axe z. La longueur de l'axe Z mesure 695 mm. A noter qu'on a deux moteurs indépendants le long de l'axe z qui permettent de faire des découpes inclinées

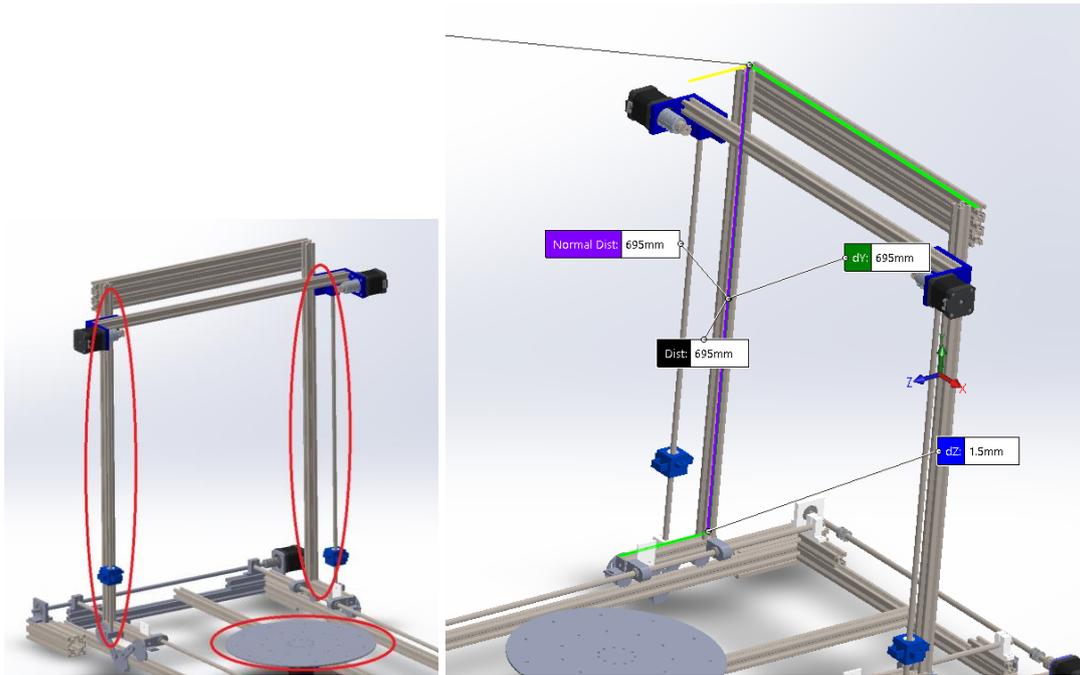


Figure 3.10 : Axe z.

L'axe Z est équipé de deux supports de fil qui permettent de déplacer verticalement le fil à l'aide de deux moteurs pas à pas et de systèmes poulie-courroie, l'utilisation des roulements de guidage permet de réduire les frottements. La **Figure 3.11** illustre la composition du sous-système de l'axe z.

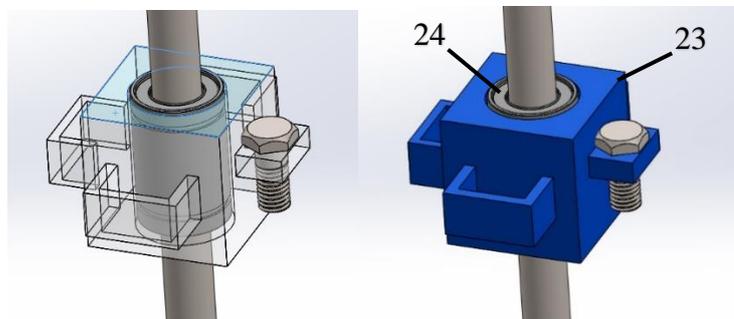


Figure 3.11 : Pièce Support de fil de découpe.

La figure 3.12 illustre le dispositif de guidage horizontal utilisant un système de poulie courroie et deux roulements linéaires pour assurer un mouvement fluide et réduire le frottement. Un support de courroie (N°27) est fixée sur le guide de l'axe Z, son rôle est de déplacer verticalement le support de fil (N°23), trois roues (N°28) sont assemblées pour réduire la déformation de tige de guidage (N°6).

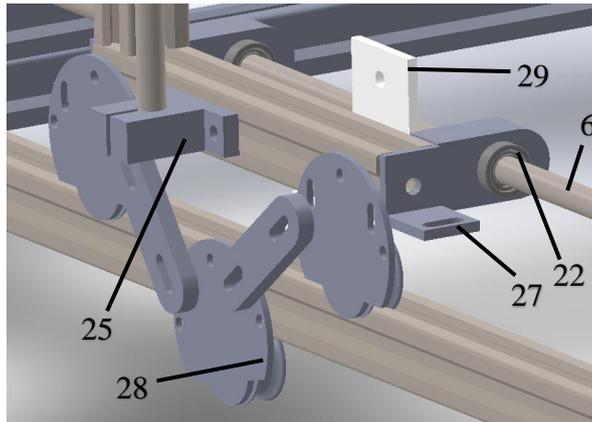


Figure 3.12 : guide horizontale de l'axe Z.

La figure 3.13 illustre l'assemblage de l'axe Z avec la numérotation des différentes pièces utilisées.

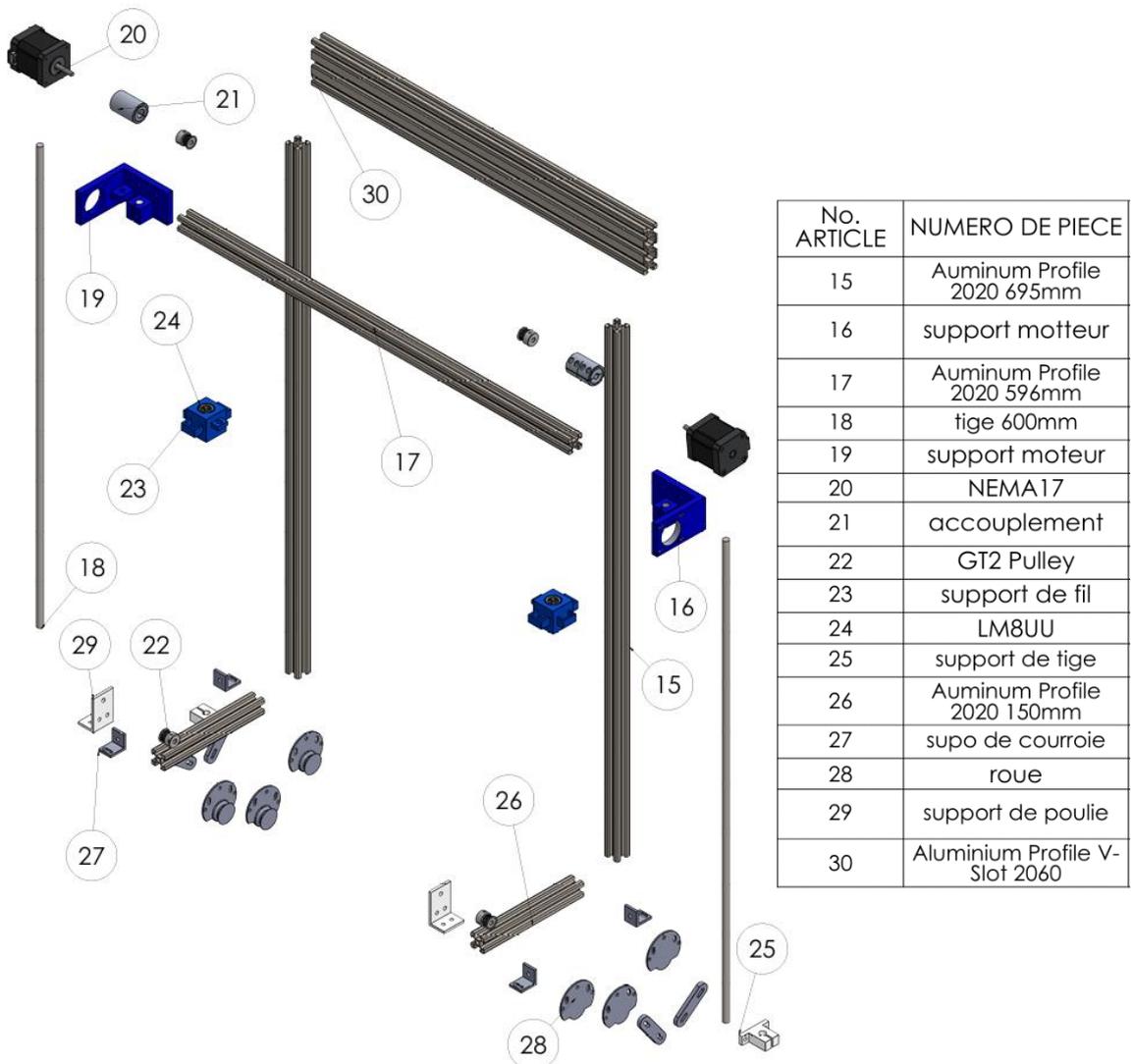


Figure 3.13 : Nomenclatures des pièces (axe z).

IV.1.3 Sous-système de rotation autour de z

La table agit comme un degré de liberté grâce à sa capacité de rotation. Elle remplit deux fonctions : elle sert à maintenir la pièce en place et la fait tourner en même temps.

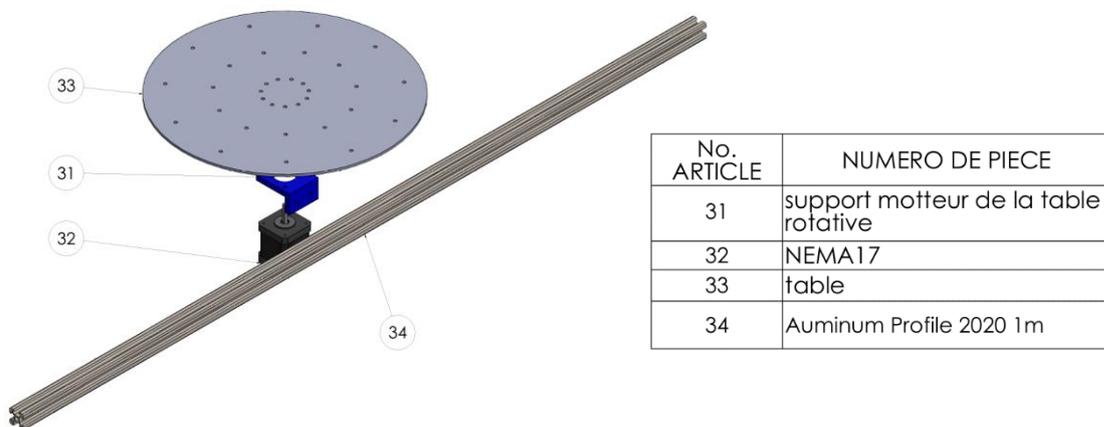
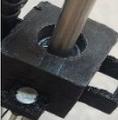


Figure 3.14 : Nomenclatures des pièces (table de l'axe z).

Tableau 3-3: Principaux composants utilisés pour la réalisation de la machine.

Piece	disignation	fonction	Matiere
	T-slot 20x20	Définir la structure du sous-ensemble du bati	alimunium
	Vis M4	fixtation	acier
	Ecrou M4	Permet de fixer des compesent sur les profiles alimunium	acier
	coruiere	Assembler les profiles alimunuim	alimunium
	Support du polley	Fixer le polley gt-2	PLA
	Polley GT-2	Transfer le mouvmemnt de rotation au courrior	alimuium
	Support d'arbre	Fixer la tige	PLA
	roue	Pour guider l'axe	acier
	Tige 8mm	Pour guider l'axe	Acier
	Roulement LM8UU	Reduier le frottement	acier
	Support de fil	Tender le fil	PLA
	Support de moteur	Fixer le moteur	PLA
	T-slot 60x20	Définir la structure du sous-ensemble du bati	alimunium
	T-slot 40x40	Définir la structure du sous-ensemble du bati	alimunium

IV.2 Analyse de l'espace de travail de la machine

Les limites de fonctionnement de la machine sont définies par un déplacement maximal de 800 mm le long de l'axe x et de 440 mm le long de l'axe z. Ces valeurs délimitent l'enveloppe de travail dans laquelle la machine peut effectuer des tâches de découpe. La limite de déplacement de 800 mm le long de l'axe x offre une portée horizontale substantielle, permettant à la machine de gérer une grande variété de tâches de découpe nécessitant un mouvement latéral. De même, la plage de déplacement de 440 mm le long de l'axe z assure une capacité verticale ample pour les opérations de découpe nécessitant un ajustement vertical.

Ces limites ainsi définies sont essentielles pour garantir que la machine fonctionne dans les limites de ses capacités de conception, empêchant toute extension excessive pouvant entraîner une défaillance mécanique ou des imprécisions dans l'exécution des tâches de découpe. En comprenant et en respectant ces limites opérationnelles, les utilisateurs peuvent maximiser l'efficacité et la longévité de la machine tout en maintenant la précision et la sécurité de son utilisation.

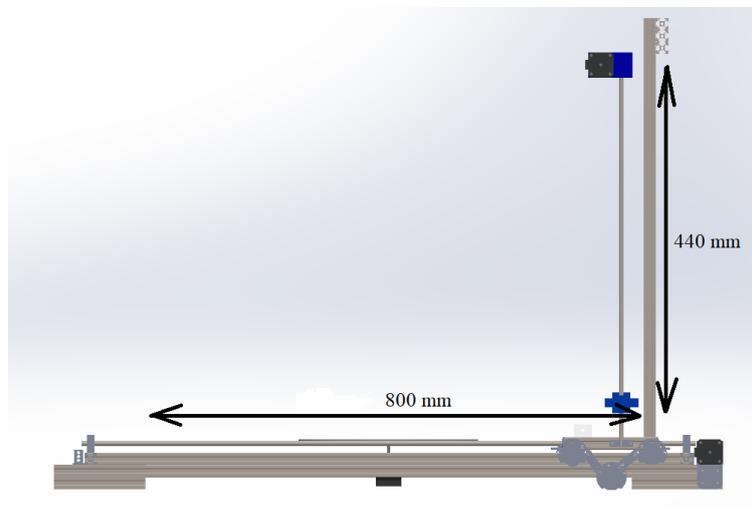


Figure 3.15 : Limites de fonctionnement de la MDFC.

Le processus d'auto home de la machine consiste à déplacer automatiquement les axes x et z vers leur position de référence prédéfinie. Pour cette machine spécifique, la position de référence pour l'axe x est à 800 mm et pour l'axe z à 440 mm.

Lorsque la commande d'auto home est activée, la machine commence par se déplacer le long de l'axe x jusqu'à atteindre la position maximale de 800 mm. Ce déplacement assure que l'axe x est correctement aligné avec la limite maximale de son enveloppe de travail. Ensuite, la machine se déplace le long de l'axe z jusqu'à atteindre la position maximale de 440 mm. Cela garantit que l'axe z est correctement aligné avec la limite supérieure de son enveloppe de travail.

IV.3 Dimensionnement des organes

Le dimensionnement des organes mécaniques est une étape cruciale dans la conception et l'ingénierie des systèmes mécaniques. Il consiste à déterminer les dimensions optimales et les spécifications des composants pour assurer leur fonctionnalité, durabilité et sécurité. Ce processus prend en compte divers facteurs, tels que les charges appliquées, les estimations des masses le choix de courroie, étude statique et RDM le choix des moteurs et roulement et les conditions d'exploitation,

afin de garantir que chaque organe répond aux exigences de performance et de fiabilité dans son application spécifique.

IV.3.1 Estimation des masses

La machine est composée de divers éléments :

- Les éléments standardisés, avec leurs masses correspondantes, sont répertoriés dans divers catalogues. (Tige de 8mm, écrou, roulement...)
- Les fournisseurs fournissent également les masses des moteurs d'entraînement, soit directement sur la boîte du produit, soit sur leur site internet.
- Des pièces spécifiquement conçues pour s'adapter à cette machine, dont les masses sont estimées grâce au logiciel de CAO SolidWorks. Celui-ci tient compte des dimensions et du matériau de construction des pièces.

IV.3.1.1 Sur l'axe de Z

Tableau 3-4: les estimations des masses des différents éléments de l'axe z.

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	POIDS (kg)	QTE
15	Auminium Profile 2020 695mm	0.856	2
16	support moteur	0.061	1
17	Auminium Profile 2020 596mm	0.362	1
18	tige 600mm	0.489	2
19	support moteur	0.061	1
20	NEMA17	0.570	2
21	accouplement	0.023	2
22	GT2 Pulley	0.034	4
23	support de fil	0.042	2
24	LM8UU	0.074	2
25	support de tige	0.029	2
26	Auminium Profile 2020 150mm	0.184	2
27	supo de courroie	0.005	4
28	roue	0.036	6
29	support de poulie	0.014	2
30	Aluminium Profile V-Slot 2060	0.924	1

Le tableau 3.4 donne une estimation des masses des différents éléments constitutifs de l'axe z, ce qui nous amène vers une masse globale de l'axe z en déplacement de $\sum mi = 3.858 \text{ kg}$

IV.3.1.2 Sur l'axe de X

Tableau 3-5: les estimations des masses des différents éléments de l'axe x.

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	POIDS (kg)	QTE
1	Auminium Profile 2020 1m	1.232	2
2	Aluminuim profile 4040 150mm	1.123	4
3	Auminium Profile 2020 400mm	0.55468	2
4	Auminium Profile 2020 80mm	0.197	4
5	support de tige	0.0298	4
6	tige 8mm L1010mm	0.781	2
7	LM8UU	0.148	4
8	supo moteur bas	0.016	1
9	Accouplement	0.023	1
10	tige D8 L500	0.212	1
11	GT2_20T-sh8	0.00878	2
12	supo tige 500mm	0.013	1
13	roullement 8mm	0.0206	1
14	NEMA17 17HS8401.step	0.285	1

Le tableau 3.5 donne une estimation des masses des différents éléments constitutifs de l'axe x, ce qui nous amène vers une masse globale de l'axe x de $\sum mi = 4.643 \text{ kg}$

IV.3.2 Calcul de courroie

IV.3.2.1 Calcul de courroie sur axe Z

a) Détermination de la puissance de calcul

Pour déterminer la puissance de calcul, il faut commencer par rechercher le facteur de service de la transmission. Depuis le tableau de facteur de service [22] Nous avons trouvé $K_s=1.6$ car la durée de vie du service varie de [16 heures ; 24 heures].

$$P_{\text{calc}} = K_s \times P = 1.6 \times 0.16 = 0.256 \text{ kw}$$

P : puissance de moteur = 160w [23].

b) Sélection du pas de courroie :

D'après le graph de sélection du pas de la courroie [22], pour une puissance de 0.256 kW et une vitesse de 1000 tr/min, on a besoin d'une courroie au pas de 8mm.

c) Calcul de la longueur :

On a l'entraxe de 610.29 mm et les diamètres d_1 et d_2 est de 12mm.

$$L=2 \times C + \frac{\pi}{2} (d_1 + d_2) + \frac{(d_2-d_1)^2}{4 \times C}$$

$$L=2 \times 610.29 + \frac{\pi}{2}(12 + 12) + \frac{(12-12)^2}{4 \times 610.29} = 1258.27mm$$

PM : poulie motrice.

PR : poulie réceptrice.

C : entraxe (distance entre les axes de rotation des poulies).

d_1 : diamètre de PM.

d_2 : diamètre de PR.

d) Calcul de la vitesse linéaire

Utilisons la formule [24] :

$$v = \frac{\pi \times N \times d}{60} = 628.31 \frac{mm}{s} = 0.62831 m/s$$

N : nombre de tours nécessaire = 1000tr/min

e) Angle d'enroulement

$$\theta_{\text{e}} = 180^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{D - d}{2 \times C}\right) = 180^\circ$$

$\theta = \theta_{\text{e}}$: arc d'enroulement sur la petite poulie (en rad)

C = 610.29mm.

D = d = 12mm.

IV3.2.2 Calcul de courroie sur axe de X

a) Calcul de la puissance de calcul

$$P_{\text{c}} = K_{\text{c}} \times P = 1.6 \times 0.16 = 0.256 kw$$

K_{c} : facteur de service = 1.6 [22].

P : puissance de moteur = 160w.

Les informations fournis dans la fiche technique du moteur [23] couple=0.5Nm à 3000tr/min

$$P=0.105 \times 0.5 \times 3000 = 160w$$

b) Sélection de pas

D'après les données obtenues on a les mêmes données que l'axe de Z donc on prend le pas 8mm.

c) Calcul de la longueur de courroie sur axe de X

On a l'entraxe de 1045.8mm et d_1 et d_2 est de 12mm.

$$L=2 \times C + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{(d_2-d_1)^2}{4 \times C}$$

$$L=2 \times 1045.8 + \frac{\pi}{2}(12 + 12) + \frac{(12-12)^2}{4 \times 1045.8} = 2129.29mm$$

d) Calcul de vitesse linéaire

Nous utilisons la même formule que celle utilisée pour le calcul de l'axe z :

$$v = \frac{\pi \times N \times d}{60} = 628.31 \frac{mm}{s} = 0.62831 m/s$$

e) Angle d'enroulement

$$\theta = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{D - d}{2 \times C} \right) = 180^\circ$$

Avec : $C = 1045.8mm$.

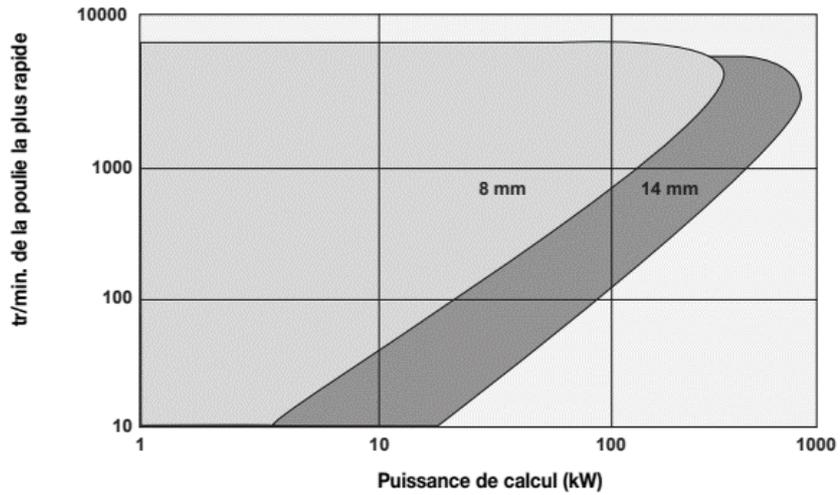


Figure 3.16 : sélection du pas [22].

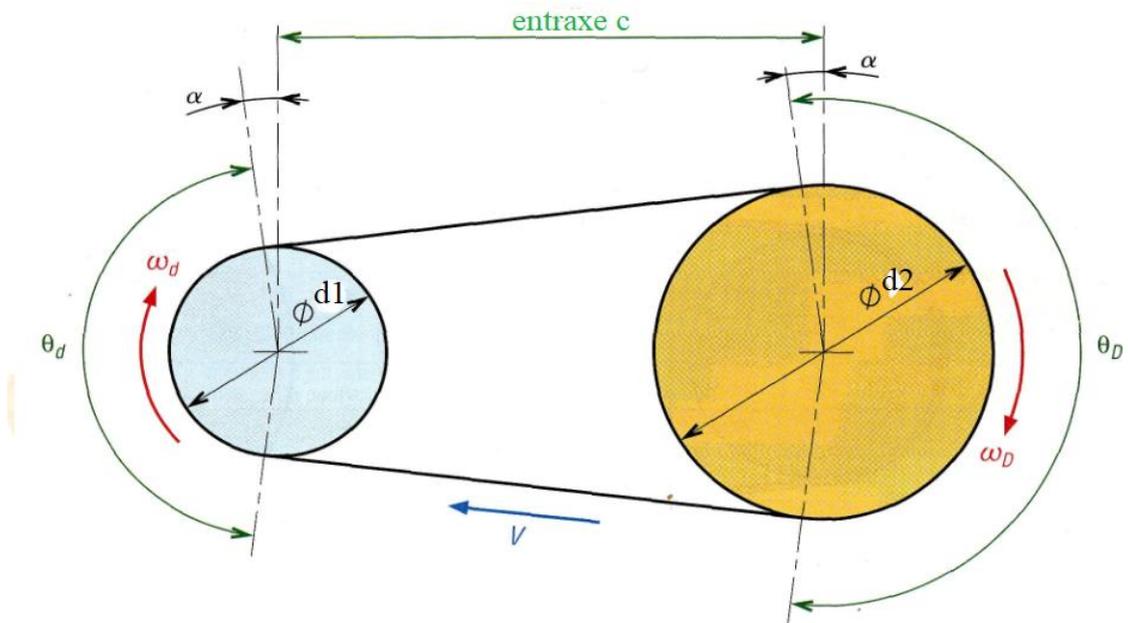


Figure 3.17: Transmissions par poulies et courroies.

Tableau 3-6: Tableau facteur de service [22].

MACHINE ENTRAINEE	ENTRAINEMENT					
Les machines entraînées citées ci-dessous ne donnent qu'un échantillon représentatif. Choisissez un entraînement qui corresponde à vos besoins par ses caractéristiques de puissance.	Moteurs à courant alternatif/triphasé: couple normal, moteurs à cage d'écureuil, moteurs synchrones, moteurs à courant monophasé, moteurs commandés par fréquence. Moteurs à courant continu: circuit dérivé, moteurs pas à pas. Moteurs à combustion multicylindres.			Moteurs à courant alternatif/triphasé: couple élevé, monophasé, couplage en série, rotor bobine monophasé. Moteurs à courant continu: couplage en série, excitation compound. Servo-moteurs. Moteurs à combustion monocylindres. Lignes d'arbres. Accouplements.		
	Service intermittent	Service normal	Service continu	Service intermittent	Service normal	Service continu
	jusqu'à 8 h/jour ou service saisonnier	8-16 h/jour	16-24 h/jour	jusqu'à 8 h/jour ou service saisonnier	8-16 h/jour	16-24 h/jour
Installations de remplissage. Instrumentation. Appareils de mesure. Appareils médicaux. Machines de bureau. Installations de projections.	1,0	1,2	1,4	1,2	1,4	1,6
Appareils de nettoyage des sols. Machines à coudre. Sérigraphie: four, tambour, conique. Machines à bois (légères): scies à ruban, tours.	1,1	1,3	1,5	1,3	1,5	1,7
Agitateurs pour liquides. Convoyeurs: courroies, charges moyennes. Perceuses. Tours. Scies. Machines de blanchisserie. Machines à bois (lourdes): scies circulaires, décapeuses, raboteuses.	1,2	1,4	1,6	1,6	1,8	2,0

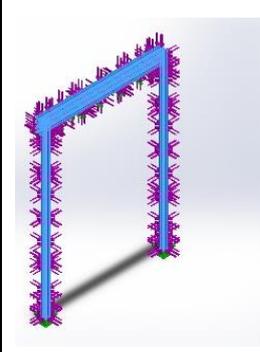
IV.3.3 Etude statique

L'analyse statique dans SolidWorks Simulation consiste à examiner divers composants pour comprendre leur comportement sous différentes conditions de charge. Certaines pièces sont analysées pour leur capacité à supporter leur propre poids (auto-chargement), tandis que d'autres sont évaluées pour leur capacité à résister à des forces extérieures. Cette analyse permet de déterminer la répartition des contraintes, le déplacement et le facteur de sécurité, garantissant l'intégrité structurelle et les performances du design. Grâce à ces simulations, les ingénieurs peuvent optimiser les conceptions pour des scénarios autoportants et chargés extérieurement.

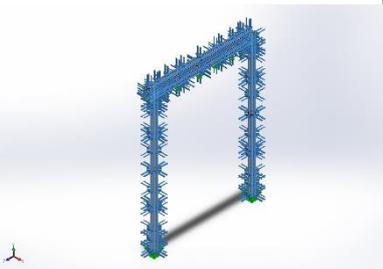
IV.3.3.1 Cadre de l'axe Z

Dans cette étude statique, nous avons examiné la réaction d'un corps (N°15 & 30) soumis à son propre poids. L'objectif est de comprendre les contraintes internes et les déformations causées par ce poids. En évaluant ces forces, nous identifions les propriétés et les forces appliquer et les fixations assurant ainsi la stabilité et la sécurité de la structure.

a) Propriété de matériaux

Model Reference	Properties	Components
	Name: aluminium Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: 1e+08 N/m² Compressive strength: 3e+09 N/m² Elastic modulus: 6.9e+10 N/m² Poisson's ratio: 0.33 Mass density: 3,960 kg/m³ Shear modulus: 2.6e+10 N/m² Thermal expansion coefficient: 170 /W(m.k)	SolidBody 1(Fillet1)(Aluminium Profile V-Slot 2060-1), SolidBody 1(Saliente-Extruir3)(Auminium Profile 2020 695mm-1), SolidBody 1(Saliente-Extruir3)(Auminium Profile 2020 695mm-2)

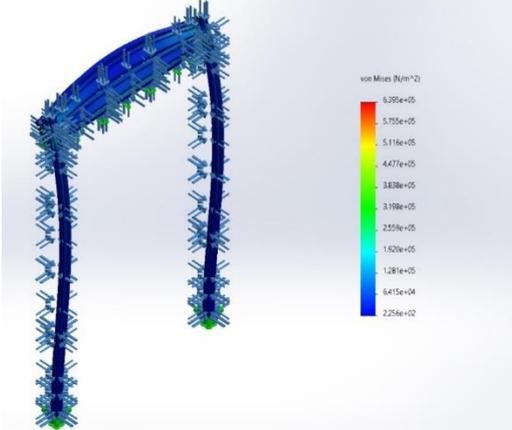
b) Force et fixation

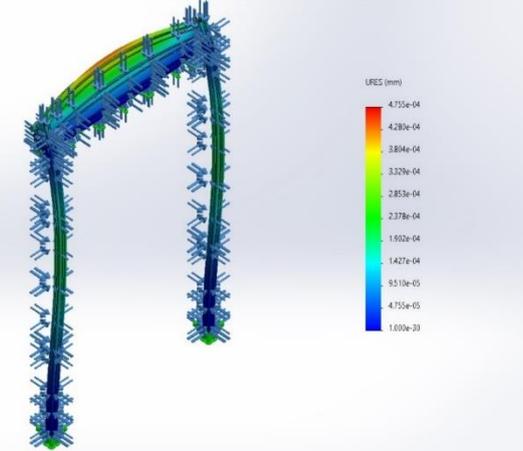
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 4 face(s) Type: Fixed Geometry
Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 27 face(s) Type: Apply normal force Value: 16.62

c) Information sur le maillage

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	13.3577 mm
Tolerance	0.667885 mm
Mesh Quality	High

d) Résultat de l'étude

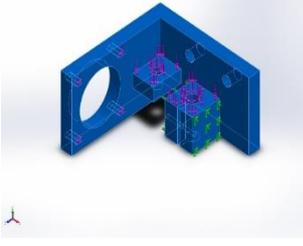
Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	2.256e+02N/m ² Node: 53759	6.395e+05N/m ² Node: 37180
 <p>cadre z-Static 1-Stress-Stress1</p>			

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00mm Node: 700	4.755e-04mm Node: 2888
			

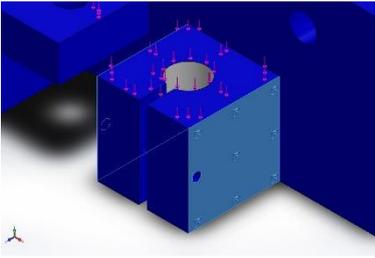
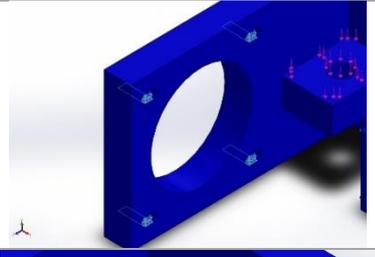
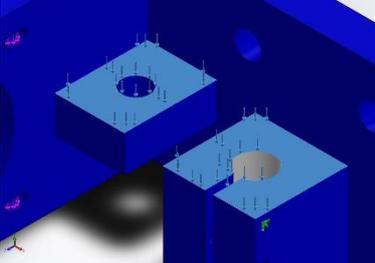
IV.3.3.2 Supports des moteurs de l'axe Z

Dans cette étude statique, nous avons analysé le support d'un moteur (N°16) pour comprendre ses réactions sous l'effet des forces appliquées. Nous avons défini les surfaces de fixation et les surfaces où les forces sont appliquées et nous avons défini aussi les propriétés. Ensuite, nous avons exécuté des simulations pour observer les résultats. L'objectif est d'assurer que le support est suffisamment robuste pour maintenir le moteur en toute sécurité.

A) Propriété de matériaux

Model Reference	Properties	Components
	Name: PLA Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: 3e+07 N/m² Elastic modulus: 2e+09 N/m² Poisson's ratio: 0.394 Mass density: 1,020 kg/m³ Shear modulus: 3.189e+08 N/m²	SolidBody 1(Boss-Extrude5)(support moteur)

b) Force et fixation

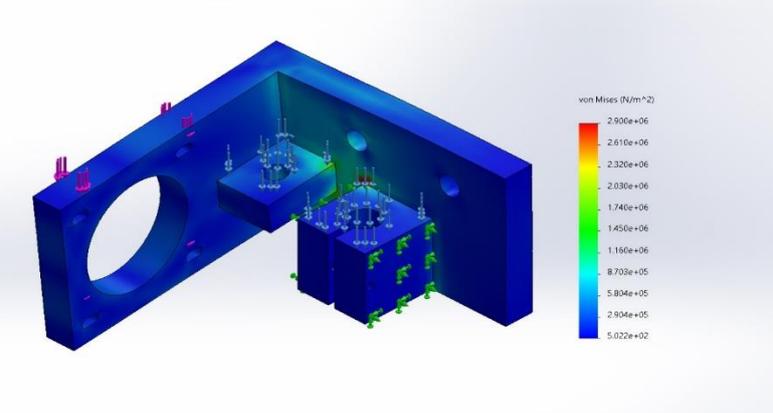
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-2		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry
Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 4 face(s) Type: Apply normal force Value: 2.79 N
Force-2		Entities: 2 face(s) Type: Apply normal force Value: 3.55 N

c) information sur le maillage

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	3.65565 mm
Tolerance	0.182782 mm
Mesh Quality	High

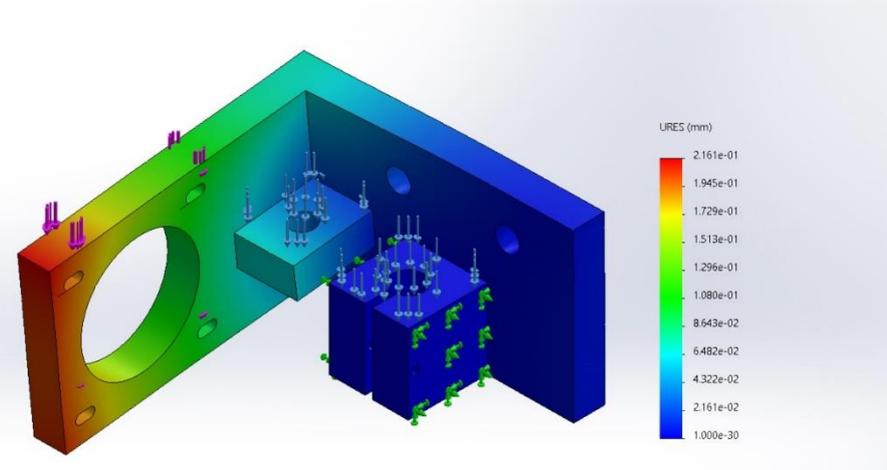
e) Résultat de l'étude

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	5.022e+02N/m^2 Node: 13937	2.900e+06N/m^2 Node: 335



support moteur -Static 1-Stress-Stress1

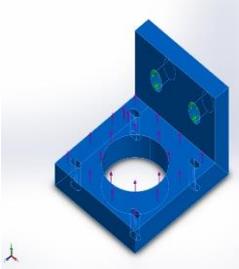
Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00mm Node: 46	2.161e-01mm Node: 730



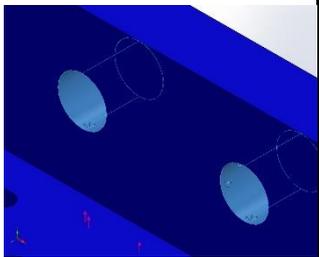
IV.3.3.3 Support de moteur de la table rotative

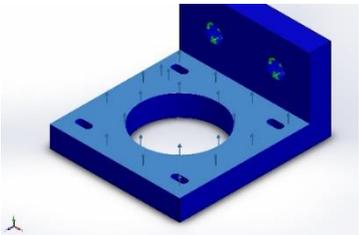
Dans cette étude statique, nous avons analysé un autre support (N°31) de conception différente pour apprécier ses réactions sous l'effet des forces appliquées. Nous avons défini les surfaces de fixation et les surfaces où les forces sont appliquées. Ensuite, nous avons exécuté des simulations pour observer les résultats. L'objectif est d'assurer que ce support est suffisamment robuste pour maintenir la charge en toute sécurité.

f) Propriété de matériaux

Model Reference	Properties	Components
	Name: PLA Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: 3e+07 N/m² Elastic modulus: 2e+09 N/m² Poisson's ratio: 0.394 Mass density: 1,020 kg/m³ Shear modulus: 3.189e+08 N/m²	SolidBody 1(Cut-Extrude3)(support moteur)

g) Force et fixation

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry

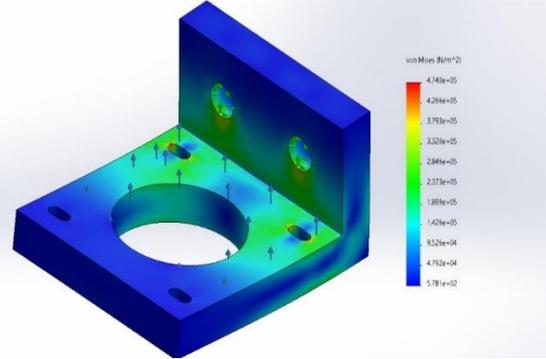
Load name	Load Image	Load Details
Force-2		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: -2.79 N

h) Information sur le maillage

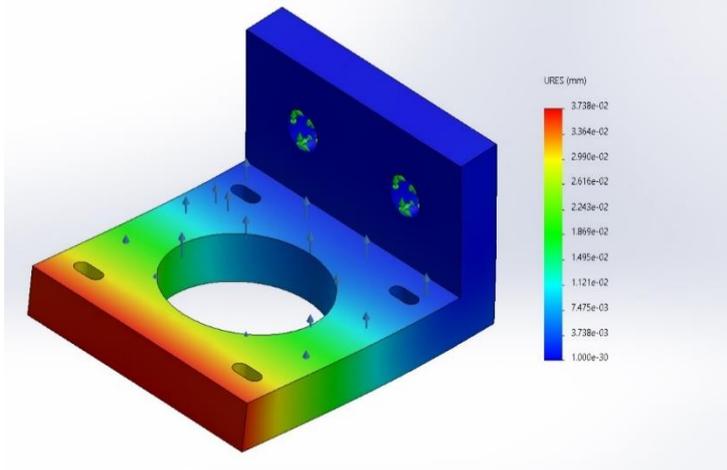
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	2.5287 mm
Tolerance	0.126435 mm
Mesh Quality	High

i) Résultat de l'étude

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	5.781e+02N/m ² Node: 11723	4.740e+05N/m ² Node: 12264



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00mm Node: 1	3.738e-02mm Node: 11675



support moteur -Static 1-Displacement-Displacement1

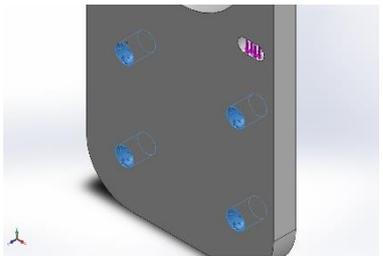
IV.3.3.4 Support de moteur de l'axe x

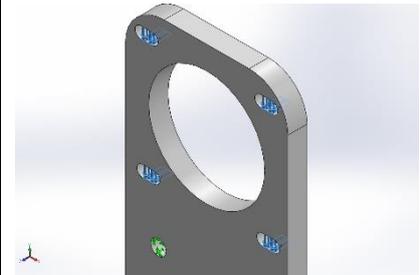
Dans cette étude statique, nous avons examiné le support du moteur de l'axe X (N°8) pour apprécier ses réactions face aux forces appliquées. Nous avons spécifié les surfaces de fixation ainsi que celles sur lesquelles les forces sont exercées. Ensuite, nous avons réalisé des simulations pour observer les résultats.

j) Propriété de matériaux

Model Reference	Properties	Components
	Name: PLA Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: 3e+07 N/m² Elastic modulus: 2e+09 N/m² Poisson's ratio: 0.394 Mass density: 1,020 kg/m³ Shear modulus: 3.189e+08 N/m²	SolidBody 1(Cut-Extrude2)(supo moteur axe x)

k) Force et fixation

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 4 face(s) Type: Fixed Geometry

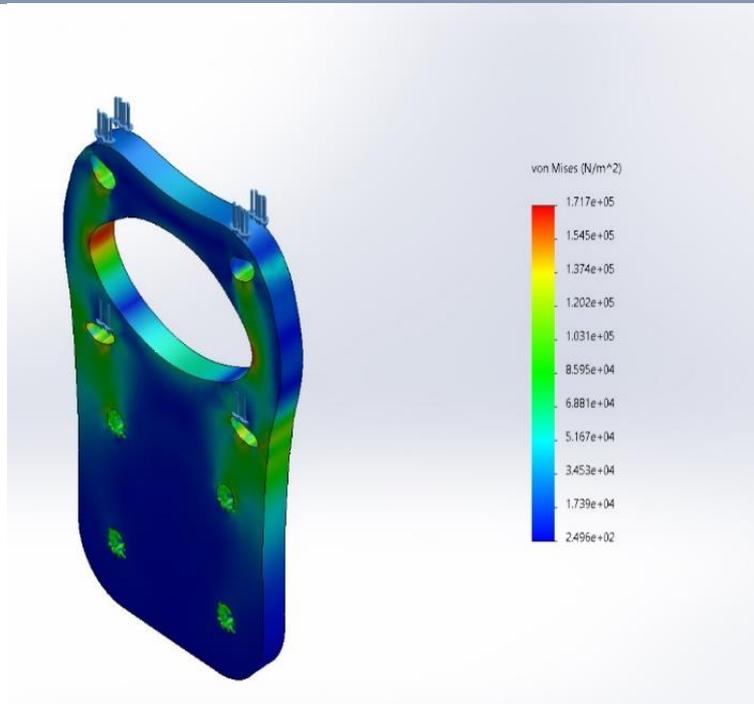
Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 8 face(s) Type: Apply normal force Value: 2 N

l) Information sur le maillage :

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points for High quality mesh	16 Points
Element Size	2.33335 mm
Tolerance	0.116668 mm
Mesh Quality	High

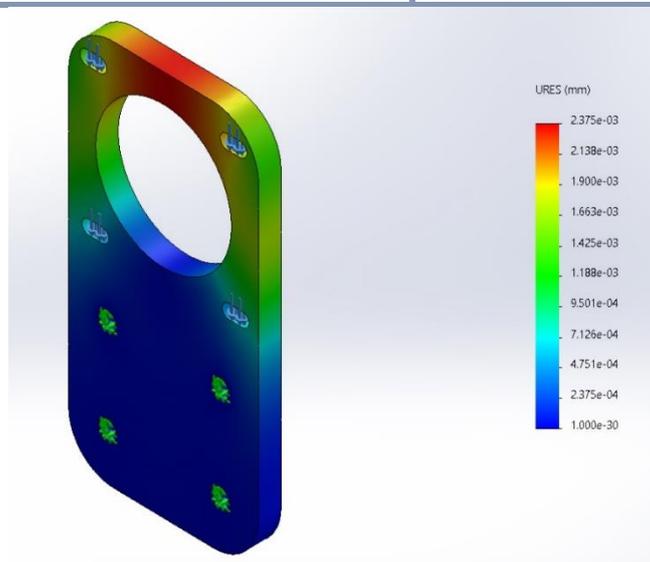
m) Résultats de l'étude

Name	Type	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	2.496e+02N/m ² Node: 13089	1.717e+05N/m ² Node: 114



supo moteur axe x-Static 1-Stress-Stress1

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+00mm Node: 171	2.375e-03mm Node: 8055



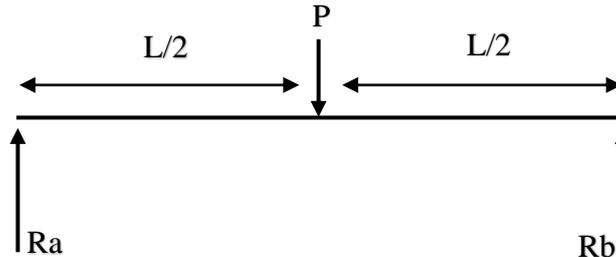
supo moteur axe x-Static 1-Displacement-Displacement1

IV.3.4 Etude RDM

L'étude de la Résistance des Matériaux (RDM) permet de comprendre comment les structures de géométrie simple réagissent aux charges externes. Dans cette première partie, nous calculons les efforts tranchants et les moments fléchissant. Ensuite, nous évaluerons la déformation résultante pour garantir la sécurité et l'efficacité des structures. Ces analyses sont essentielles pour la conception et la maintenance de diverses composants mécaniques particulièrement la poutre N°6.

IV.3.4.1 Calcul de l'effort tranchant $T(x)$ et du moment fléchissant $M(x)$

On détermine les valeurs de l'effort tranchant et du moment fléchissant par la méthode des sections, deux zones sont considérées :

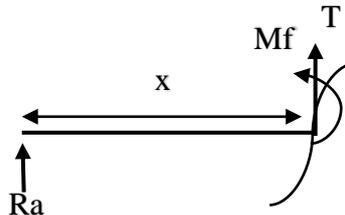


P représente le poids de l'axe Z sur la tige, ce poids est représenté au milieu puisque ce cas est le plus dangereux.

$$P = F = 3.858 \times 9.81 = 37.84698 \text{ N.}$$

$$R_a = R_b = P/2 = 18.92581 \text{ N}$$

- Zone 1 : $0 \leq x \leq 500 \text{ mm}$

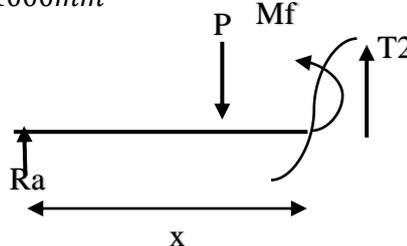


$$\sum P = 0 \rightarrow R_a + T_1 = 0 \rightarrow T_1 = 18.92581 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 \rightarrow -R_a \times x + M \rightarrow x = 0 \rightarrow M = 0 \text{ N.mm}$$

$$\rightarrow x = 500 \rightarrow M = 9462.92 \text{ N.mm}$$

- Zone 2 : $500 \leq x \leq 1000 \text{ mm}$



$$\sum P = 0 \rightarrow R_a - T_2 - P = 0 \rightarrow T_2 = -18.92581 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 \rightarrow -R_a \times x + M + P(x - 500) \rightarrow x = 500 \rightarrow M = 9462.92 \text{ N.mm}$$

$$\rightarrow x = 1000 \rightarrow M = 0 \text{ N.mm}$$

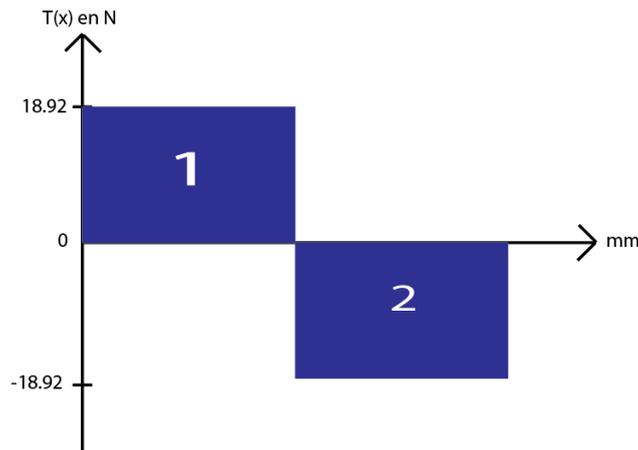


Figure 3.18 : diagramme des efforts tranchants.

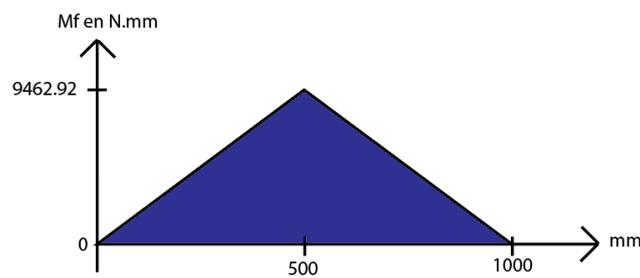


Figure 3.19 : diagramme du moment fléchissant.

IV.3.4.2 Calcul de la déformation

On a une tige de 8mm qui repose sur deux appuis et le cas le plus défavorable est celui où la charge est dans le milieu de la poutre $x=L/2$

- Calcul de la flèche maximale :

$$\frac{P}{2}x \rightarrow 0 \leq x \leq \frac{L}{2} / \frac{P}{2}(L-x) \rightarrow \frac{L}{2} \leq x \leq L$$

- Equation de la courbure de la poutre :

$$Mf(x) = EI \frac{d^2y}{dx^2}$$

Pour $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P}{2}x \rightarrow EI \frac{dy}{dx} = \frac{P}{4}x^2 + C_1'$$

$$\rightarrow EIy = \frac{P}{12}x^3 + C_1'x + C_2''$$

Conditions aux limites :

Pour : $x=0 : y=0 \rightarrow C_2=0$

Pour : $x=L/2 : dy/dx=0$

$$\text{Centre} \rightarrow C_1 = -\frac{P}{16} L^2$$

En remplaçant dans l'équation, on trouve que:

$$EIy = \frac{P}{12} \left(\frac{L}{2}\right)^3 - \frac{P}{16} L^2 \left(\frac{L}{2}\right)$$

$$y = -\frac{F \times L^3}{48 \times E \times I}$$

Où F est la force appliquée et L est la longueur, E est le module élastique de la poutre et I est le moment d'inertie.

- App. Num: E = 205000 mpa [12], L=1000mm, I=201.06mm⁴, F/2=18.92 N.

$$y = -\frac{18.92 \times 1000^3}{48 \times 205000 \times 201.06} = -9.65\text{mm}$$

On voit que dans cette configuration la flèche est très importante ce qui affectera la qualité de découpe. Pour y remédier, nous avons adopté la solution de renforcement illustrée par la figure 3.19. En effet, nous avons ajouté trois roues de guidage (N°28) pour réduire efficacement la déflexion de la poutre N°6.

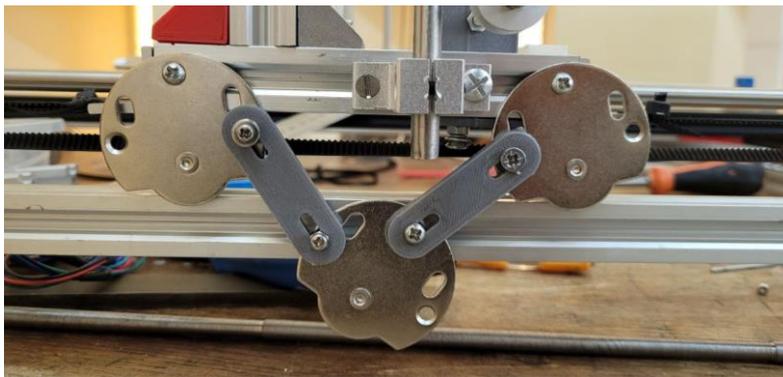


Figure 3.20 : solution pour réduire le déplacement.

IV.3.5 Choix de moteur

Pour le dimensionnement de choix de moteur on a calculé la puissance de construction et on a recherché un moteur ayant une puissance supérieure à la puissance de construction [25].

IV.3.5.1 Choix de moteur pour le déplacement de l'axe Z

Il est important de comprendre l'influence de 3 paramètres :

- L'inertie : elle correspond à la résistance d'un objet au changement de vitesse.
- La vitesse
- Le couple : est le facteur le plus important dans le dimensionnement d'un moteur.

$$P_c = \frac{Q \times V}{K \times n}$$

P_c : puissance de construction.

$n = 0.75$: rendement sommaire [25],

On a fixé $V = 25 \text{ m/min}$ comme la vitesse nécessaire maximale de la machine.

Q : la masse totale des éléments de l'axe Z.

$$Q = \sum M_i = 3.85848 \text{ kg.}$$

$K = \frac{60}{9.81}$ = est une constants et 9.81 est la gravite.

Donc :

$$P_c = \frac{3.85848 \times 25 \times 9.81}{60 \times 0.75} = 21.028 \text{ w} = 0.021028 \text{ kw}$$

Le moteur qu'on a trouvé dans le laboratoire est le NEMA 17 pour lequel on va calculer sa puissance pour vérifier.

Les informations fournies dans la fiche technique du moteur [23] indiquent que le moteur a un couple nominal de 0,5 Nm à 3000 tr/min. en conséquence :

$$\text{puissance de moteur } P = 0.105 \times T(\text{Nm}) \times N(\text{rpm}) = 0.105 \times 0.5 \times 3000 = 160 \text{ w}$$

Alors, la puissance de moteur NEMA 17 est 0.16kw donc le moteur NEMA 17 répondre au besoin.

IV.3.5.2 Choix de moteur pour le déplacement de fil sur l'axe Z :

Les efforts de coupe dans cette machine sont négligeables grâce à le découpage thermique ou le fil chauffée découpe la pièce sans entrer en contact. (Q =masse de éléments N°24&23).

$$P_c = \frac{(0.02127 + 0.037) \times 25 \times 9.81}{60 \times 0.75} = 0.178 \text{ w} = 0.000178 \text{ kw}$$

Il existe deux supports de fil alors :

$$P_c(\text{totale}) = P_c \times 2 = 0.000356 \text{ kw}$$

La puissance de moteur NEMA 17 est de 0.16kw alors nous allons utiliser ce moteur pour le déplacement vertical de fil.

IV.3.6 Vérification de choix de roulement

La vérification de choix de roulement est basée sur trois critères [26] :

- La charge sur le roulement est inferieur a la charge statique de base $P < C_0$
- La durée de vie de roulement $>$ durée de vie nécessaire.
- La charge dynamique de construction $<$ la charge dynamique de base (C)

On va utiliser les formules données dans la référence [26] :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n$$

L_{10} : durée nominale.

C : charge dynamique de base.

n est égale à 3 presque nous avons roulement à billes.

On prend $P = F_r$, presque la charge est purement radiale.

$$P = F_r$$

P : charge dynamique équivalent.

F_r : la force radiale.

$$L_{10h} = L_{10} \times \frac{10^6}{60 \times N}$$

L_{10h} : durée de service nominale.

N : vitesse de rotation [tr/min].

La charge dynamique de construction :

$$L_{10} = \frac{60 \times N \times L_{10h}^{10} \text{nécessaire}}{10^6}$$

$$C = P(L_{10})^{\frac{1}{3}}$$

C : la charge dynamique de construction [N].

IV.3.6.1 Vérification de roulement sur l'axe Z

La charge dynamique de base de roulement est 380N d'après le catalogue de roulement [27]. La charge statique de base de roulement est 560N [27] avec $P/2 = F_r/2 = 18.9108$ N. Ainsi on a répartie la charge appliquée sur les deux roulements de la (Fig. 3.20).

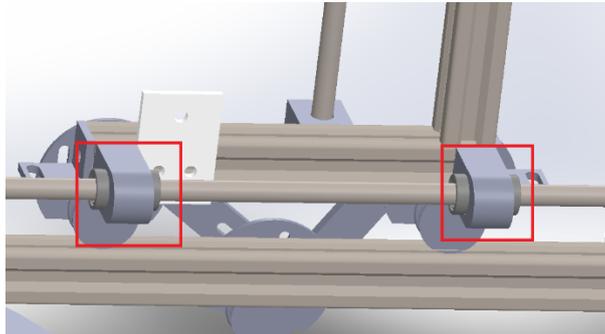


Figure 3.21 : les roulements d'axe Z.

La charge sur le roulement est inférieure à la charge statique de base $P < C_0$.

$$L_{10} = \left(\frac{380}{18.9108} \right)^3 = 8113.73 \text{ millions de tours}$$

On prend $N=1000$ tr/min.

$$L_{10h} = 8113.73 \times \frac{10^6}{60 \times 1000} = 135228.8333 \text{ heures}$$

L_{10h} nécessaire est 80000 heures

$$L_{10h} > L_{10h} \text{ nécessaire}$$

$$L_{10} = \frac{60 \times 1000 \times 80000}{10^6} = 4800 \text{ millions de tours}$$

$$C = 9.475 \times (4800)^{\frac{1}{3}} = 159.83 \text{ N}$$

La charge dynamique de base de roulement est 380N d'après le catalogue de roulement [27].

$$\text{Donc : } 159.83 \text{ N} < 380 \text{ N}$$

Alors le roulement LM8UU est vérifié.

IV.3.6.2 Vérification de roulement de roulement sur l'axe X

d'après le catalogue de roulement [27], La charge dynamique de base de roulement est 3450N. en outre, La charge statique de base de roulement est 1370N. Donc, $P=Fr=2.079\text{N}$ car la charge appliquée est purement axiale.

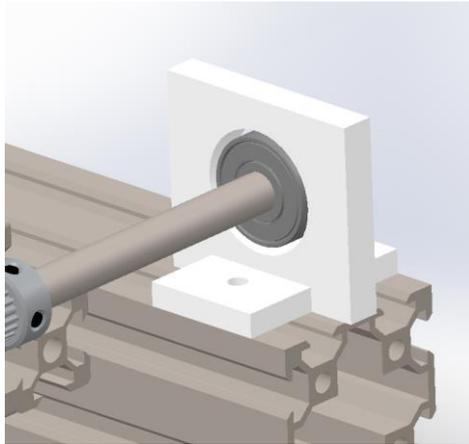


Figure 3.22 : roulement de l'axe X.

La charge sur le roulement est inférieure à la charge statique de base $P < C_0$.

$$L_{10} = \left(\frac{3450}{2.079} \right)^3 = 4569764476 \text{ millions de tours}$$

On prend $N=1000$ tr/min.

$$L_{10h} = 4569764476 \times \frac{10^6}{60 \times 1000} = 7.616274126 \times 10^{10} \text{ heures}$$

L_{10h} nécessaire est 80000 heures

$$L_{10h} > L_{10h} \text{ nécessaire}$$

$$L_{10} = \frac{60 \times 1000 \times 80000}{10^6} = 4800 \text{ millions de tours}$$

$$C = 1.039 \times (4800)^{\frac{1}{3}} = 17.5349 \text{ N}$$

La charge dynamique de base de roulement est 3450N d'après le catalogue de roulement [27].

$$\text{Donc : } 17.5349 \text{ N} \lllllll 3450 \text{ N}$$

Alors le roulement 608-2RSH est vérifié.

IV.3.7 Génération de la chaleur à travers le fil

La génération de chaleur à l'intérieur d'un fil est un aspect vital dans de nombreuses applications, notamment la découpe à chaud par fil et le chauffage par résistance électrique.

Le phénomène est que lorsque le courant traverse un fil, la résistance convertit l'énergie électrique en chaleur, un processus connu sous le nom l'effet de joule, Comprendre la génération de

chaleur est crucial pour des processus de découpe efficaces et pour gérer les problèmes thermiques dans les circuits électriques.

Le fil est généralement en Nichrome de diamètre 0.3mm, il a une résistance 1ohm par 305mm, la loi d'ohm peut être utilisée pour déterminer le courant requis :

$$I = \frac{V}{R}$$

I : est le courant.

V : la tension.

R : la résistance.

Dans ce cas, on a une longueur de fil de 370mm donc 1.21ohm

On peut calculer la puissance nécessaire en [watt] :

$$P = V \times I$$

Le choix du voltage et de l'ampérage dépend de la température nécessaire dans le fil alors on a testé quelques matières premières pour trouver les bonnes températures, le voltage et l'ampérage nécessaires.

IV.3.7.1 Les essais

Pour mesurer la température du fil sous différents voltages, nous avons utilisé la caméra thermique UTi120T :

a) Caméra thermique UTi120T

La caméra thermique UTi120T est un dispositif de mesure infrarouge portable offrant des images thermiques précises pour détecter des variations de température avec une résolution de 120x90 pixels.



Figure 3.23 : caméra thermique UTi120T.

b) Essai N°1

Lors du premier essai, nous avons utilisé une tension de 12V ; nous allons maintenant calculer l'ampérage nécessaire :

$$I = \frac{12}{1.21} = 9.91 \text{ amperes.}$$

Et la puissance sera :

$$P = V \times I = 118.92 \text{ watt}$$

Cette configuration produit une température très élevée de 157°C, comme indiqué sur la figure 3.23 :



Figure 3.24 : température de fil dans le 1^{er} essai.

c) Essai N°2

Dans le deuxième essai, nous utilisons une tension de 7,5V pour réduire la température du fil afin de couper un polystyrène de moindre densité. Nous devons déterminer l'intensité nécessaire pour cette tension :

$$I = \frac{7}{1.21} = 6.19 \text{ amperes.}$$

Et la puissance sera :

$$P = V \times I = 43.38 \text{ watt}$$

L'expérience indique une température plus basse de 67,2°C, comme le montre la figure 3.24, ce qui nous permet de découper du polystyrène moins dense :



Figure 3.25 : température de fil dans 2^{ème} essai.

Dans ces deux expériences, la chaleur reste dans le fil et n'affecte pas les pièces attachées au fil.

d) Conclusion

En conclusion, si nous devons couper du polystyrène de densité plus élevée, nous avons besoin d'une tension et d'un courant plus élevés pour produire une température plus élevée. En revanche, si nous devons couper du polystyrène de densité plus faible, nous avons besoin d'une tension et d'un courant plus bas, ce qui nous donne une température plus basse.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la conception de notre machine, en commençant par une analyse fonctionnelle pour élaborer un Cahier des Charges réalisable, suivi de la sélection de solutions technologiques. Ensuite, nous avons dimensionné les parties les plus critiques du système, telles que les tiges et les roulements. Nous avons observé que tous les composants résistaient parfaitement aux sollicitations auxquelles ils étaient soumis, et que le système fonctionnait dans des conditions optimales, permettant un fonctionnement continu avec des pertes de puissance minimales. En résumé, les matériaux utilisés et les techniques de fabrication garantissent un fonctionnement optimal et sécurisé.

Chapitre 4 : Réalisation de la machine

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la mise en œuvre de la partie mécanique, y compris la fabrication de pièces en impression 3D, le système de guidage, et la réalisation de la structure jusqu'à l'assemblage final. Ensuite, nous aborderons les différents éléments des parties électriques, tels que les réglages des drivers (pilotes de moteur) et du fil chaud, puis nous présenterons le schéma global. La dernière partie sera dédiée à la description du schéma de pilotage par PC (CNC) et aux logiciels utilisés (UGS, etc.). Enfin, nous discuterons des tests expérimentaux réalisés sur des pièces 1D, 2D, 3D, ainsi que 4D.

II. Mise en œuvre de la partie mécanique

Dans cette section, nous aborderons la mise en œuvre de la partie mécanique de notre projet. Nous commencerons par la réalisation des pièces à l'aide de l'impression 3D, qui constitue une étape cruciale pour obtenir des composants précis et sur-mesure. Ensuite, nous décrirons la conception et la mise en place du système de guidage, essentiel pour assurer des mouvements fluides et précis. Enfin, nous détaillerons la réalisation de la structure complète et le processus d'assemblage final, aboutissant à la construction intégrale de notre système mécanique.

II.1 Réalisation de pièces en impression 3D

Pour la réalisation des pièces en impression 3D, nous avons utilisé le logiciel CURA pour générer le **G-CODE** et ajuster les paramètres de l'impression.

II.1.1 Logiciel CURA

Le logiciel CURA est un outil essentiel dans le domaine de l'impression 3D. Développé par Ultimaker, CURA est un logiciel open source de "tranchage" qui transforme des modèles 3D numériques en instructions compréhensibles par une imprimante 3D. Il permet de générer le G-CODE, qui contient toutes les informations nécessaires pour piloter l'imprimante, telles que la trajectoire de la tête d'impression, les vitesses de déplacement, les températures et d'autres paramètres cruciaux. CURA offre une interface conviviale et de nombreuses options de réglage, permettant aux utilisateurs d'optimiser leurs impressions pour obtenir des résultats précis et de haute qualité.

II.1.2 Utilisation de logiciel CURA

Avant d'utiliser CURA, il est nécessaire d'enregistrer la pièce à imprimer au format (. STL). Ce format est pris en charge par presque tous les logiciels de modélisation et d'impression 3D, ce qui en fait un standard incontournable dans l'industrie. La **figure 4.1** illustre les étapes suivies pour réaliser les pièces en impression 3D et générer le G-CODE correspondant.

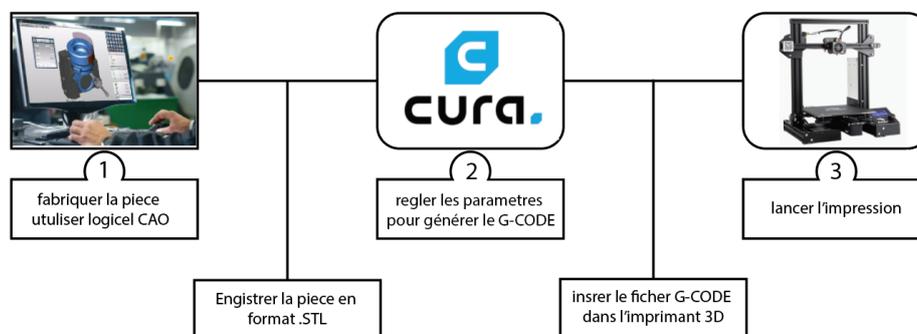


Figure 4.1 : schéma de l'impression 3D.

a) Comment ajouter la machine d'impression dans CURA

La première étape pour utiliser CURA est d'ajouter la machine dans cura.

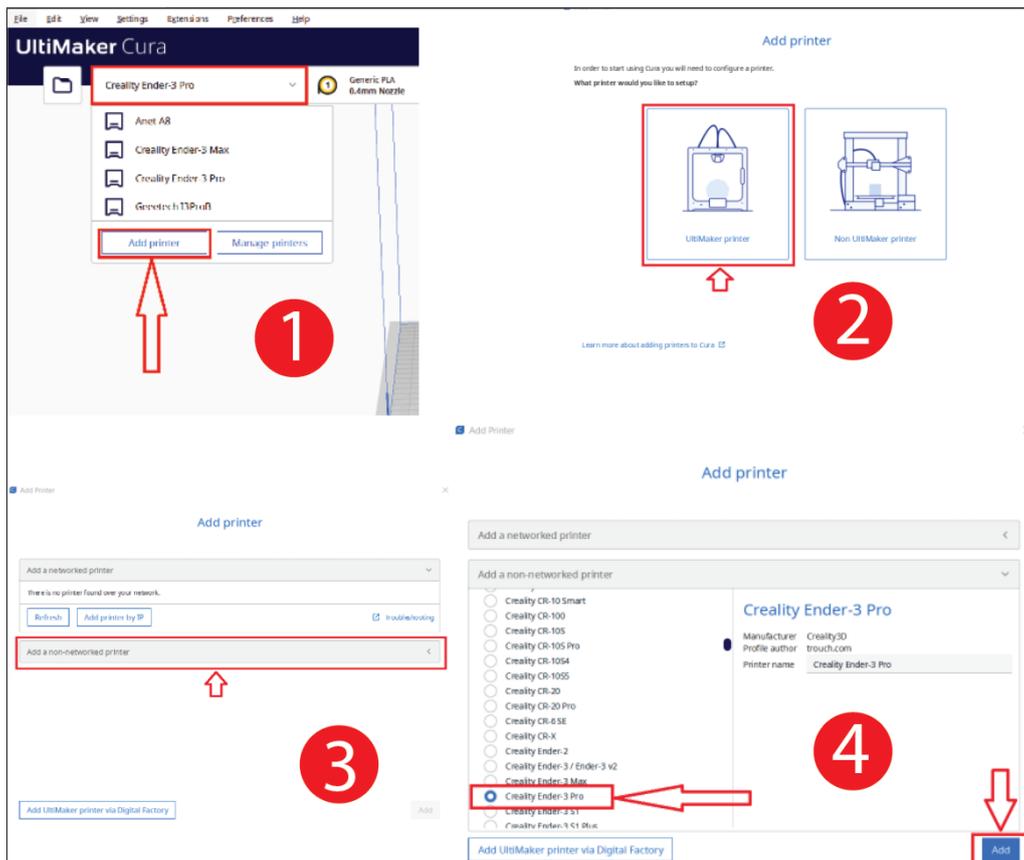


Figure 4.2 : ajoute de la machine dans Cura.

Ajoute imprimant → Ultramaker printer → ajouter une imprimante non connectée au réseau → choisir notre imprimant.

b) Réglage des paramètres d'impression

L'Ouverture du fichier STL dans CURA constitue la première étape. Ensuite, il faut ajuster la qualité de l'impression (hauteur de couche), régler la densité de la pièce, la température de la buse, et celle du plateau chauffant. Après cela, il est important de définir la vitesse d'impression et d'activer, si nécessaire, les supports pour l'impression. Un facteur crucial est la bonne adhérence de la pièce au plateau de construction pour assurer la stabilité durant l'impression. (**Voire fig.4.3.**)

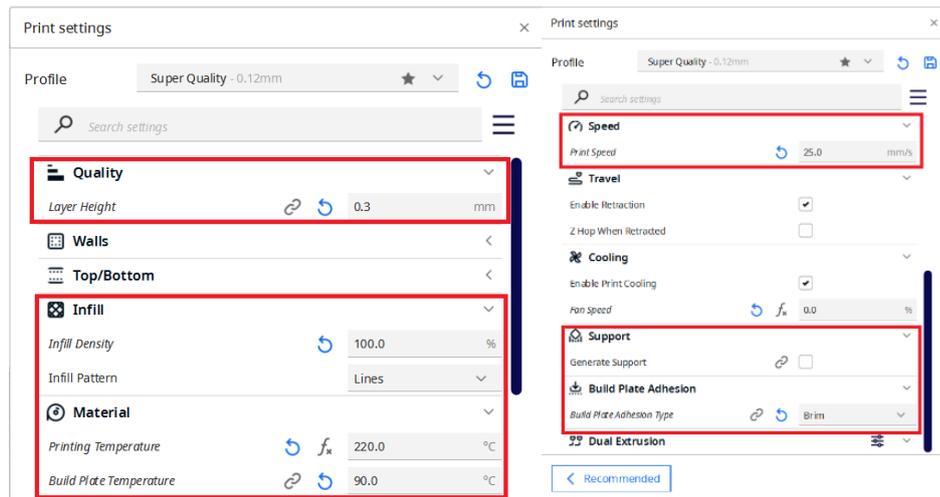


Figure 4.3 : Paramètres de l'impression.

Après avoir réglé les paramètres, il faut cliquer sur "slice" puis sur "preview" pour visualiser l'état provisoire final de la pièce après l'impression, comme illustré à la figure 4.4.

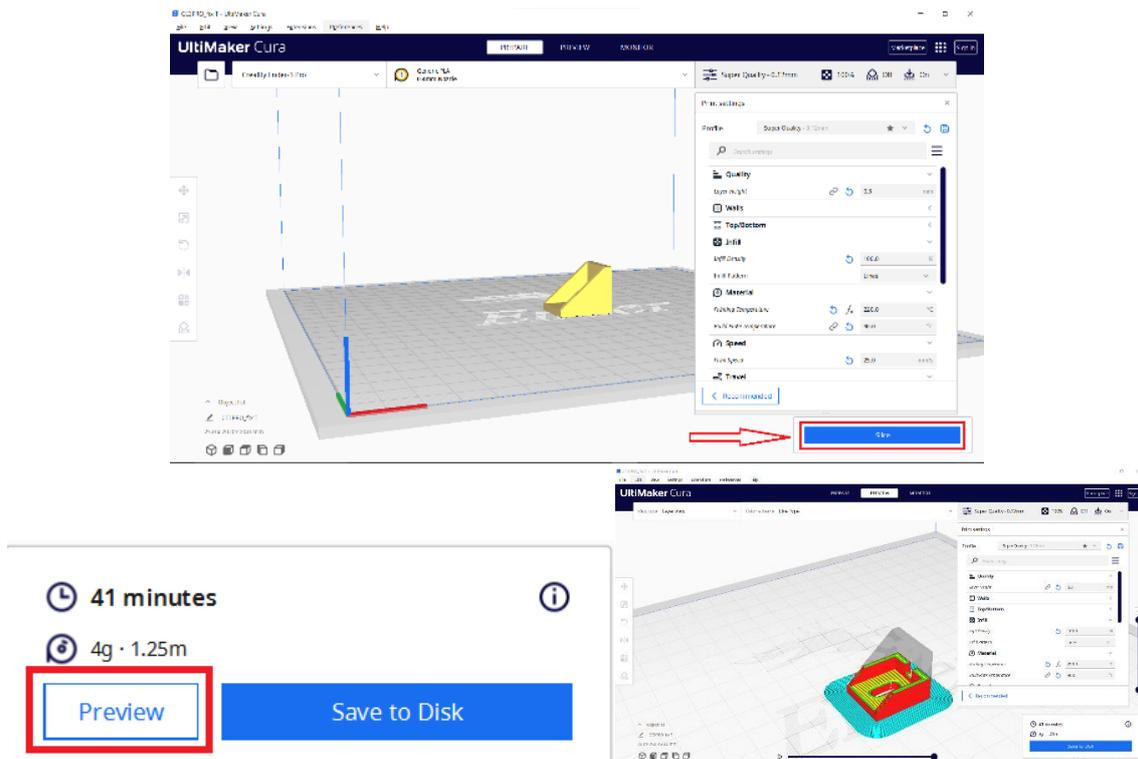


Figure 4.4 : Pré-visualiser l'état final de la pièce avant impression.

Ensuite, nous avons atteint la dernière étape : la génération du G-CODE. Il suffit de cliquer sur « save to disk » pour enregistrer le G-CODE au format (.ngc).

c) Lancement de l'impression

Une fois le G-code finalisé, nous copions le fichier sur la carte mémoire de la machine. Ensuite, pour démarrer l'impression, il suffit de cliquer sur « print from TF », de sélectionner le fichier G-code, et l'impression commencera automatiquement.

II.2 Réalisation de la structure

Les profils en aluminium utilisés mesurent 1000mm et 400mm de long. Conformément au modèle 3D, nous les avons coupés à la bonne taille à l'aide d'une scie à métaux manuelle. Ensuite, nous avons assemblé le cadre de base en utilisant des équerres de coin. La prochaine étape consiste à installer les colliers d'arbre pour l'axe X.

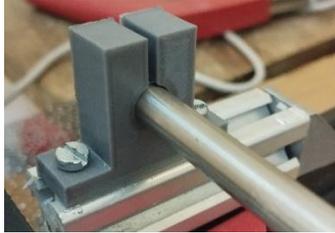


Figure 4.5 : installation de la tige.

Ensuite, nous insérons la tige de l'arbre à travers les supports de tiges. À mi-chemin, nous devons également ajouter le bloc coulissant de l'axe Z. Nous plaçons simplement les deux roulements dedans et les insérons sur la tige. Maintenant, nous pouvons faire glisser la tige de l'autre côté et la fixer en place à l'aide d'un boulon M4 et d'un écrou. Nous avons répété ce processus pour l'autre côté également.

Ensuite, nous devons installer les axes Z. Pour cela, nous commençons par insérer les tiges dans les blocs coulissants de l'axe Z, en les plaçant au ras du bas de la pièce et en les fixant à l'aide d'écrous et de boulons M4. Ensuite, nous pouvons insérer les blocs coulissants de l'axe Z. Ces blocs coulissants utilisent chacun deux roulements linéaire.



Figure 4.6 : installation de la tige de l'axe Z.

Pour fixer les supports de montage qui relient les deux tiges de l'axe Z au profilé au-dessus, nous utilisons une méthode constante. Initialement, nous fixons le profilé en plaçant trois boulons M5 à travers des écrous pour profilés sur les supports de montage. Ensuite, je glisse simplement le profilé en place et serre fermement les boulons.



Figure 4.7 : les supports de moteur et la tige.

Ensuite, nous fixons les pieds sur le cadre de la base. Une fois les pieds sécurisés, nous allons insérer le premier moteur pas à pas pour l'axe X. Ensuite, nous avons une tige de 8 mm qui va entraîner simultanément les deux courroies. Pour commencer, nous l'avons coupée à la bonne taille, placé un roulement avec un diamètre intérieur de 8 mm sur le côté opposé du moteur pas à pas et passé la tige à travers celui-ci.

Ensuite, nous allons aligner les poulies avec des blocs coulissants et les fixer solidement à l'aide de vis sans tête. De l'autre côté de la machine, nous pouvons insérer les deux poulies de renvoi. Nous avons utilisé des boulons et écrous M3 à cet effet.



Figure 4.8 : système de motorisation de l'axe X.

Pour augmenter la rigidité de l'axe Z nous l'avons renforcé l'axe avec deux profils aluminium 20x20 et un profil de 20x60 comme illustré par la **fig 4.9**.



Figure 4.9 : renforcé de l'axe Z.

II.3 Réalisation des systèmes de guidage

Pour le système de guidage, nous avons employé un mécanisme à poulies et courroies, comme décrit dans les chapitres précédents. Nous avons également utilisé des roulements pour garantir une translation fluide, ainsi qu'une tige de 8 mm pour guider l'axe.

II.3.1 Réalisation de système de guidage selon l'axe X

Pour l'axe X, nous avons utilisé un système de poulies et courroies. La courroie est attachée avec des serre-câbles sur l'axe Z pour faire translater l'axe Z. Tout d'abord, nous avons inséré et fixé la courroie au bloc coulissant à l'aide d'un serre-câble. Ensuite, nous avons fait passer la courroie autour de la poulie dentée, puis autour de la poulie folle de l'autre côté. Après l'avoir coupée à la taille appropriée, nous l'avons à nouveau fixée à l'autre côté du bloc coulissant avec un serre-câble.

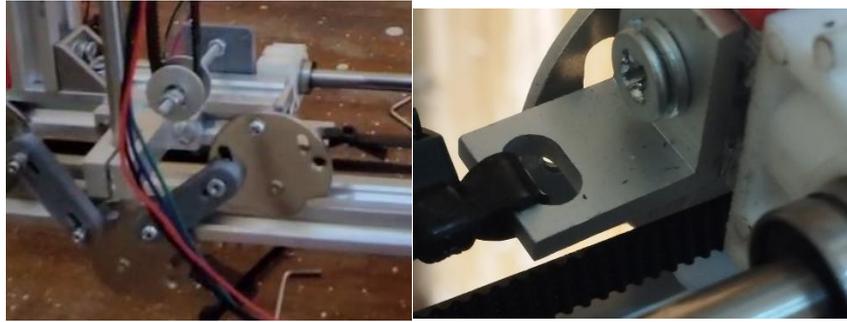


Figure 4.10 : attachement de courroie.

Nous avons suivi le même processus pour l'autre côté également. Lors de la fixation de l'autre côté, il est important de s'assurer que les deux blocs coulissants sont alignés sur l'axe X. À cette fin, nous pouvons simplement les déplacer jusqu'au bout des rails et ainsi tendre la courroie et la sécuriser avec un collier de serrage. Ainsi, le mécanisme de glissement de l'axe X est terminé.

II.3.2 Réalisation de système de guidage selon l'axe Z

Ensuite, avec la même méthode, nous assemblerons le mécanisme de l'axe Z. Pour fixer la courroie au bloc coulissant, nous utilisons à nouveau des colliers de serrage. Ici, le bloc coulissant ne comporte qu'une poignée, et pour sécuriser la courroie, nous avons d'abord attaché une extrémité avec un collier de serrage, puis nous avons tendu la courroie suffisamment et nous avons attaché les deux extrémités avec un autre collier de serrage. Maintenant, nous pouvons simplement retirer le collier de serrage précédent et couper l'excès de courroie. Comme mentionné précédemment, lors de la fixation de la courroie de l'autre côté, avec cela, le mécanisme de l'axe Z est également terminé.



Figure 4.11 : Mécanisme de guidage de l'axe Z.

II.3.3 Réalisation de la table rotative

Ensuite, nous allons fixer un autre profilé le long de l'axe X. Ce profilé servira à fixer le quatrième moteur pas à pas ainsi qu'à placer les pièces dessus. Avec ce quatrième moteur pas à pas, nous pourrions réaliser des formes en 3D ou réellement 4D avec cette machine.

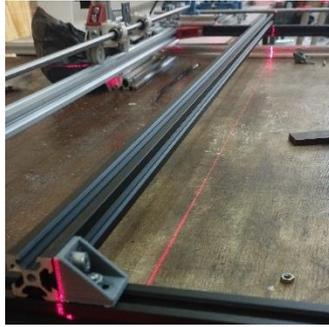


Figure 4.12 : *profile de la table.*

II.4 Assemblage final

Sur les images suivantes, on a illustré l'assemblage final de notre machine MDFC, démontrant l'intégration harmonieuse des composants mécaniques et électriques. Cette vue offre un aperçu complet de la structure, mettant en avant notre approche méticuleuse de la conception et de l'assemblage.



Figure 4.13 : *Assemblage final.*

III. Mise en œuvre de la partie électrique

III.1 présentation des différents éléments

Dans la partie électrique nous avons utilisé :

- **Drivers A4988** : Le A4988 Stepper Driver est un circuit intégré utilisé pour contrôler précisément le mouvement des moteurs pas à pas dans diverses applications électroniques.
- **CNC shield** : Un CNC shield est une carte d'extension qui permet de contrôler des moteurs pas à pas pour des applications de CNC à l'aide d'un microcontrôleur comme Arduino.
- **Arduino UNO** : L'Arduino UNO est une carte de développement open-source basée sur microcontrôleur, largement utilisée pour des projets électroniques interactifs.
- **Les cavaliers de l'Arduino** : Les cavaliers de l'Arduino sont des connecteurs ou des broches utilisés pour sélectionner différentes configurations ou modes de fonctionnement sur la carte Arduino.
- **Alimentation des moteurs** : L'alimentation 12V 6A est conçue pour fournir une tension stable et un courant suffisant afin d'alimenter jusqu'à quatre moteurs pas à pas simultanément.
- **Chauffe-fil** : Le Sunshine DC Power Supply P-3010D est une alimentation électrique permettant de fournir une tension et un courant constants pour chauffer le fil.
- **Motorisation** : Le NEMA 17 est un moteur pas à pas couramment utilisé pour ses dimensions compactes et sa performance fiable dans les systèmes nécessitant un contrôle précis du mouvement.

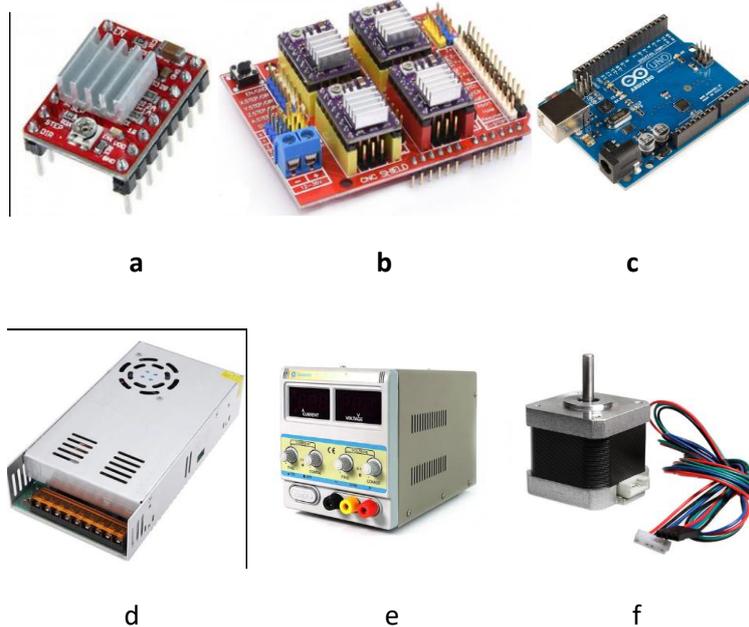


Figure 4.14 : a) Driver A4988 / b) CNC shield / c) Arduino UNO / d) Alimentation 12V 6A / e) Sunshine P-3010D / f) NEMA 17.

III.2 Réglage le driver A4988

Le Driver A4988 permet de régler le courant cible de quelques milliampères jusqu'à un peu moins de 2 ampères en ajustant la tension de référence (V_{ref}). En tournant le potentiomètre dans le sens des aiguilles d'une montre, la tension V_{ref} augmente, et elle diminue en tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. La valeur réelle de V_{ref} peut être calculée à l'aide de la formule :

$$V_{ref} = I_{max} \times 2.5 \times R_s$$

V_{ref} : Voltage référence.

R_s : sensur résistance. [Ω].

Le moteur NEMA 17 marcher dans 1.8A alors on prend $I_{max}=1.8$ et $R_s=0.1 \Omega$

$$V_{ref} = 1.8 \times 2.5 \times 0.1 = 0.45$$



Figure 4.15 : réglage de driver A4988.

III.3 Réglage de fil chaud

Le fil doit pouvoir supporter une haute température tout en maintenant une température uniforme sur toute sa longueur. Il s'agit généralement de fil en nichrome ou de fil d'acier inoxydable, qui sont à la fois peu coûteux et faciles à obtenir. Pour fonctionner correctement, le fil doit être tendu entre les deux support de fil (N°23). Voici comment nous avons procédé : nous avons fixé des boulons M5 sur les deux supports de fil (N°23) et ajouté de petits ressorts d'extension à ces boulons.

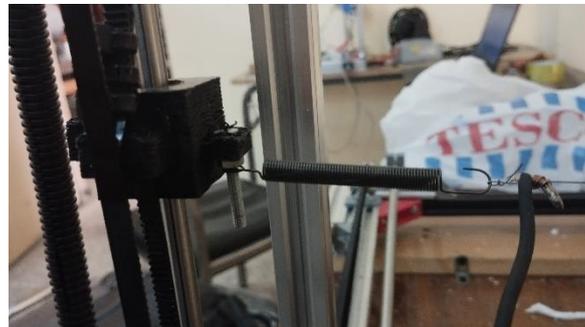


Figure 4.16 : tendeur de fil.

Ensuite, nous avons simplement attaché le fil aux ressorts. Nous avons tendu le fil autant que les ressorts le permettaient. Il est essentiel de tendre ainsi le fil avec des ressorts, car lorsqu'il chauffe, il s'allonge et les ressorts peuvent compenser cette expansion.

Ensuite, nous allons connecter le fil résistif aux câbles électriques. En utilisant l'alimentation Sunshine P-3010D, l'objectif principal est de garantir un flux constant de courant à travers le fil pour le chauffer. Il est essentiel que les câbles électriques soient suffisamment robustes pour supporter des charges de courant allant de 3 à 10 ampères.

III.4 Schéma du circuit de découpage de mousse CNC avec Arduino

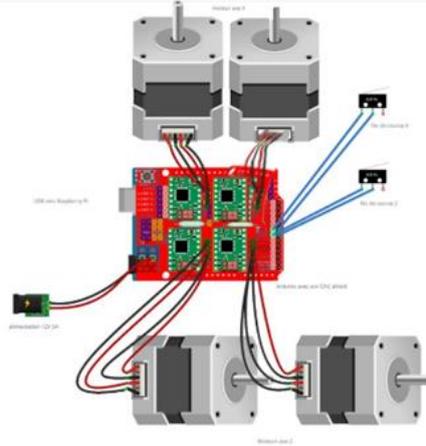


Figure 4.17 : schéma global du câblage des moteurs avec Arduino CNC Shield.

Le cerveau de cette machine CNC est une carte Arduino. En plus de celle-ci, nous avons également besoin d'un Arduino CNC Shield et de 4 pilotes de moteur pas à pas A4988.

Ensuite, nous devons sélectionner la résolution à laquelle les pilotes de moteur entraîneront les moteurs à l'aide de cavaliers. Pour ma part, j'ai choisi une résolution de 1/16 de pas en ajoutant trois cavaliers à chaque pilote, ce qui permet aux moteurs pas à pas d'avoir des mouvements plus fluides.

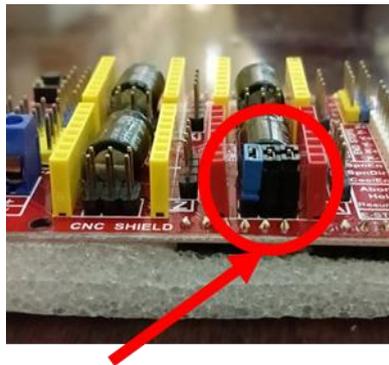


Figure 4.18 : Les cavaliers.

Ensuite, nous avons connecté les 4 moteurs pas à pas au shield CNC Arduino. Pour alimenter la machine, nous utiliserons une alimentation de 12V 6A. Le shield CNC Arduino peut fonctionner avec une tension comprise entre 12 et 36 volts.

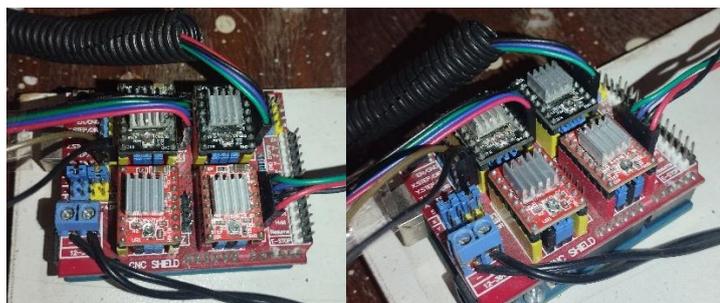


Figure 4.19 : branchement des câbles.

IV. Mise en œuvre de la partie informatique

IV.1 Description de schéma de pilotage par PC

GRBL est un logiciel ou firmware open source qui permet le contrôle de mouvement pour les machines CNC. En installant facilement le firmware GRBL sur une carte Arduino, on obtient instantanément un contrôleur CNC performant et économique. GRBL utilise le G-code en entrée et génère des commandes de mouvement via l'Arduino.

Pour une meilleure compréhension, nous pouvons consulter le schéma suivant :

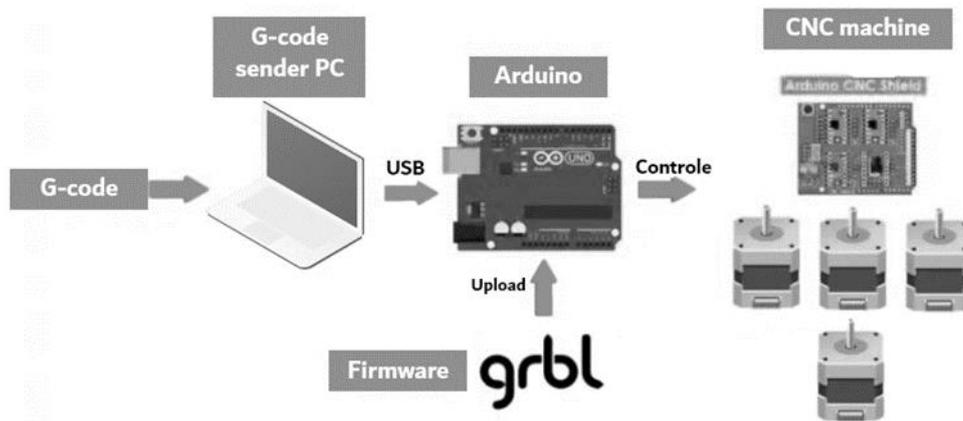


Figure 4.20 : schéma globale de pilotage par PC.

IV.2 Description des logiciels utilisés

Tout d'abord, nous devons télécharger un firmware sur l'Arduino (GRBL) pour contrôler les mouvements de la machine.

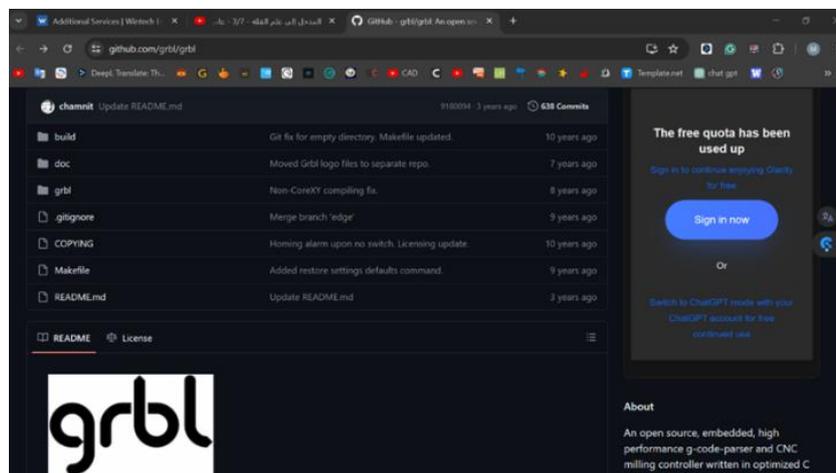


Figure 4.21 : Téléchargement de GRBL.

Il est open source et disponible en téléchargement sur GitHub.com. Après l'avoir téléchargé sous forme de fichier zip, il faut l'extraire, copier le dossier "grbl" et le coller dans le répertoire des bibliothèques Arduino. Ensuite, ouvrez l'IDE Arduino et, dans le menu Fichier > Exemples > grbl, choisissez l'exemple grblUpload. Sélectionnez la carte Arduino que vous utilisez, en l'occurrence l'Arduino UNO, ainsi que le port COM auquel elle est connectée, puis téléchargez ce sketch sur l'Arduino. Une fois téléchargé, l'Arduino saura lire les G-codes et contrôler la machine en conséquence.

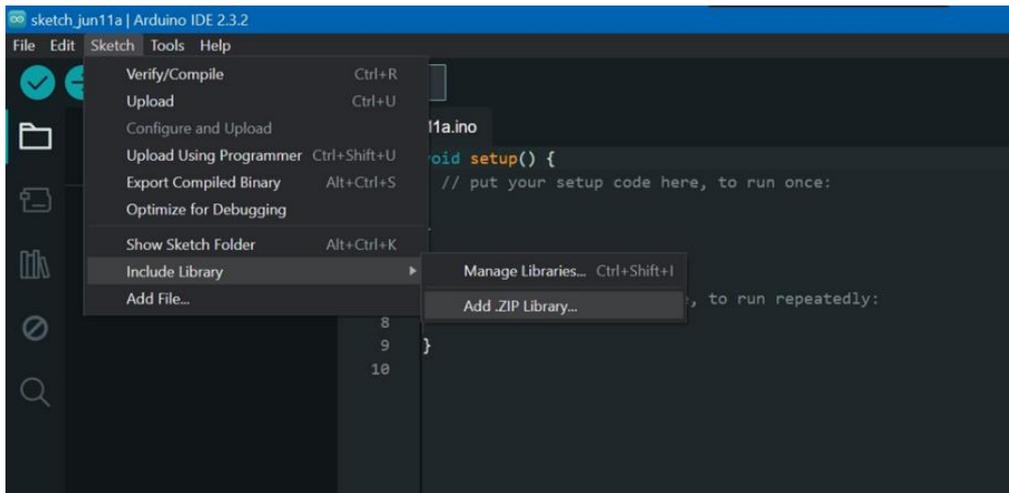


Figure 4.22 : arduino IDE.

- **Arduino IDE** : L'Arduino IDE (Integrated Développement Environment) est un logiciel open source utilisé pour écrire, compiler et téléverser des programmes sur des microcontrôleurs Arduino, offrant une interface conviviale pour le développement et le prototypage rapide de projets électroniques.

Ensuite, nous avons besoin d'une interface ou d'un contrôleur pour communiquer avec l'Arduino et lui indiquer les actions à effectuer. Pour cela, Nous choisissons à nouveau un programme open source : le Universal G-Code Sender

- **UGS : Universal G-Code Sender** est un logiciel open source utilisé pour envoyer des instructions G-Code à des machines CNC, permettant de contrôler précisément leurs mouvements et opérations.

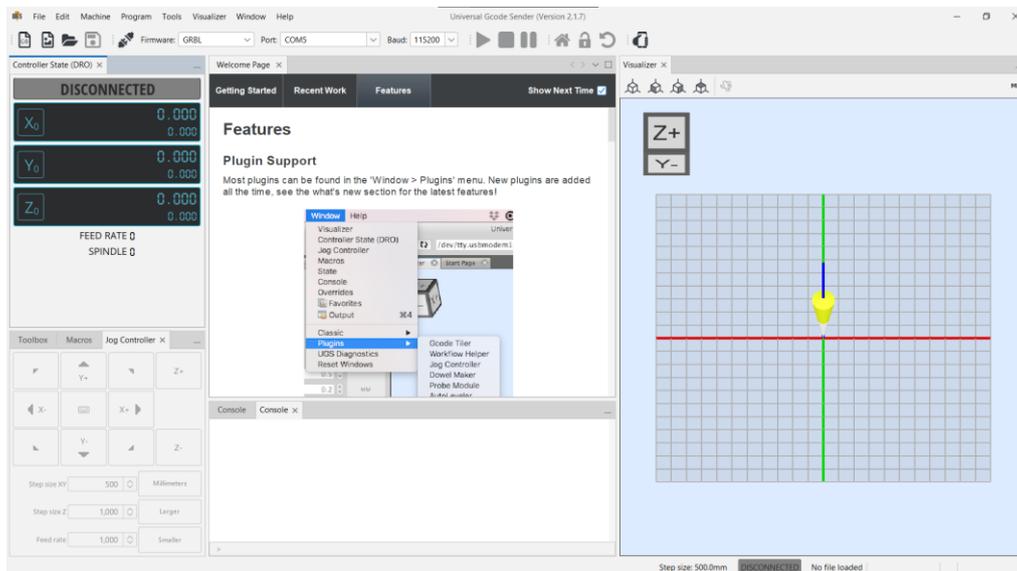


Figure 4.23 : interface de UGS.

V. Configuration de la MDFC

Une fois que nous avons ouvert le programme Universal G-Code Sender, nous devons d'abord exécuter « the setup wizard » configuration afin de paramétrer la machine.

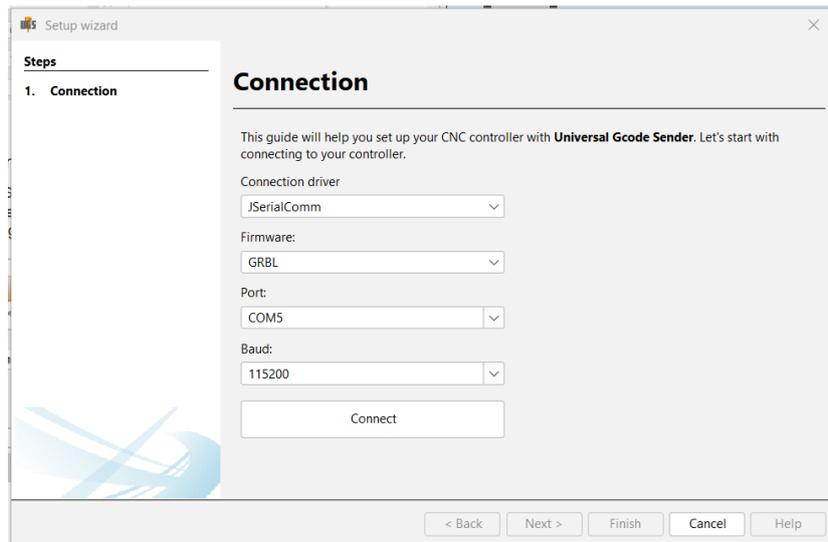


Figure 4.24 : connecter l'arduino avec UGS.

À cette étape, il suffit de sélectionner le port approprié et de connecter le programme à l'Arduino. Une fois la connexion établie, nous pouvons vérifier la direction du mouvement des moteurs en cliquant sur les boutons. Si nécessaire, nous pouvons inverser la direction. Nous avons choisi les mouvements positifs.

Ensuite, nous devons calibrer les pas des moteurs afin d'obtenir des mouvements corrects et précis. Comme nous avons sélectionné une résolution de 1/16 de pas sur les pilotes, et que les moteurs ont 200 pas physiques, cela signifie qu'il faudra 3200 pas pour que le moteur effectue une rotation complète de 360 degrés. Maintenant, en fonction du type de transmission, ou dans ce cas de la taille des poulies, nous devons calculer le nombre de pas que le moteur doit effectuer pour que la machine se déplace de 1 mm. La valeur par défaut est ici fixée à 250 pas par mm. Ainsi, lorsque nous cliquons sur l'un de ces boutons de mouvement, le moteur effectuera 250 pas.

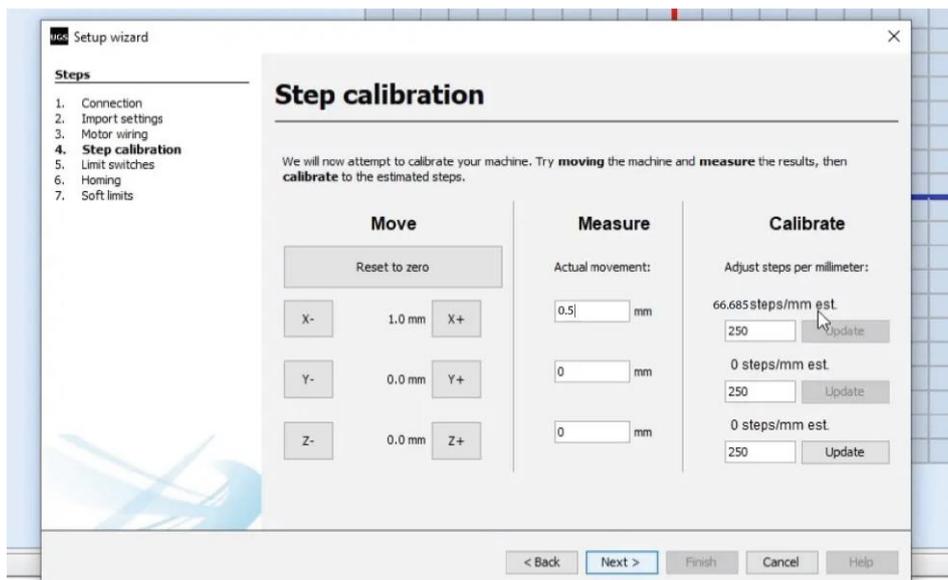


Figure 4.25 : réglage des steps/mm.

En réalité, à l'aide d'une règle, nous mesurons le déplacement réel de la machine et nous saisissons ce chiffre dans le programme. Selon cette mesure, le programme calculera et nous indiquera la valeur à laquelle nous devons modifier et mettre à jour le paramètre de pas/mm. Dans notre cas, cela correspond à 66.685 pas/mm.

Nous utilisons la même méthode pour ajuster les pas/mm de l'axe Z.

Pour la table rotative, je l'ai réglée à 400 pas/mm, ce qui signifie qu'une valeur de 1 mm pour l'axe Z correspondra à une rotation de 45 degrés.

VI. Tests expérimentaux

VI.1 Génération du G-CODE

Nous devons préparer les dessins pour que la machine CNC puisse découper les formes. Pour cela, nous avons besoin d'un logiciel de graphisme vectoriel. Encore une fois, nous avons choisi un logiciel open source, et c'est Inkscape.

- **Inkscape** : Inkscape est un logiciel de dessin vectoriel open source, utilisé pour créer et éditer des graphiques vectoriels tels que des illustrations, des logos et des diagrammes. Il est reconnu pour sa richesse en fonctionnalités de conception graphique.

Tout d'abord, nous devons régler la taille de la page selon la taille de notre zone de travail, qui est de 800x400 mm. Pour le premier exemple, nous avons téléchargé une image du logo de l'Université Saad Dahlab et l'avons importée dans le programme.

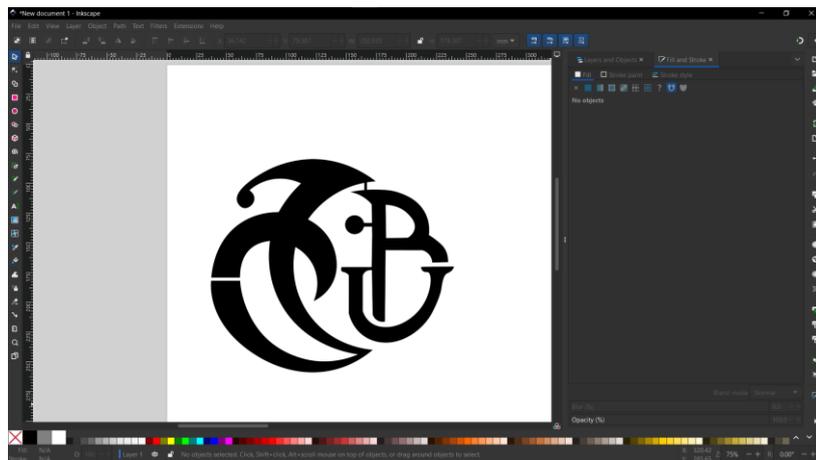


Figure 4.26 : insérée le logo dans inkscape.

Une fois notre dessin prêt, nous pouvons utiliser l'extension Gcodetools pour générer le G-code. Tout d'abord, nous devons générer des points d'orientation.

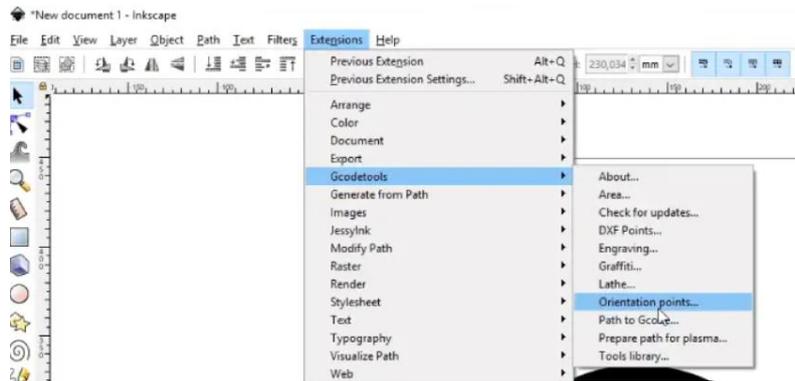


Figure 4.27 : points d'orientation.

Ensuite, nous pouvons redimensionner notre modèle aux dimensions souhaitées. Ensuite, nous devons accéder à la bibliothèque d'outils et définir l'outil que nous utilisons pour la machine CNC Arduino. Comme le fil est de forme cylindrique, nous choisirons un cylindre. Dans cette section, nous pouvons ajuster des paramètres tels que le diamètre de l'outil — Nous l'avons réglé à 1 mm— ainsi que la vitesse d'avance.

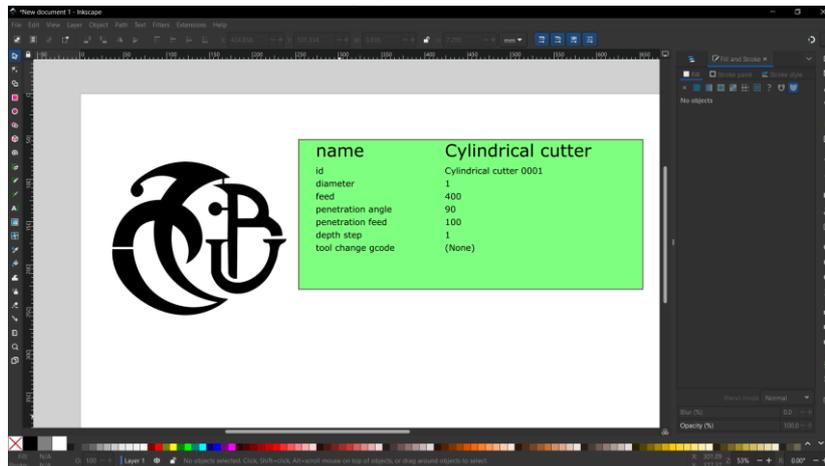


Figure 4.28 : définir l'outil.

VI.2 Lancement de découpe

Le G-code est simplement un ensemble d'instructions que GRBL ou Arduino peuvent comprendre et utiliser pour contrôler les moteurs pas à pas. Ainsi, en ouvrant le G-code dans le programme Universal G-code sender et en utilisant la fenêtre de visualisation, nous pouvons voir le chemin que la machine doit suivre.

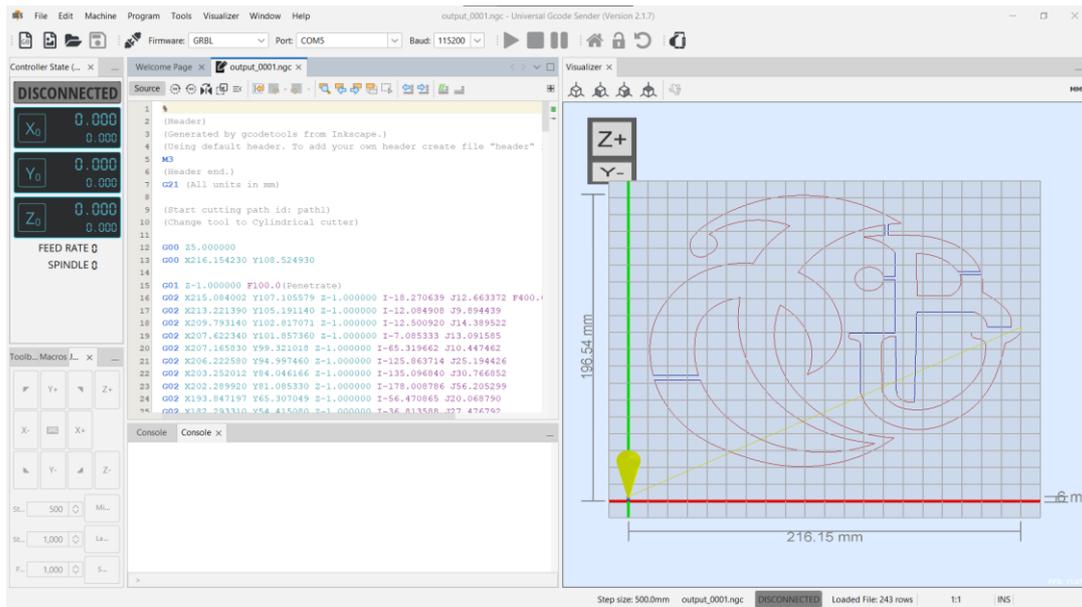


Figure 4.29 : ouverture de G-CODE dans UGS.

Dans la figure 4.30, vous pouvez observer à quoi ressemble la forme finale après découpe.



Figure 4.30 : logo de Saad Dahleb.

Voici quelques exemples que nous avons créés en utilisant la 3D, la 2D et la 4D.



Figure 4.31 : exemples d'utilisation de la MDFC développée.

VII. Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre les étapes suivies pour la mise en œuvre de la partie mécanique de notre machine. Cela inclut la réalisation des pièces par impression 3D, l'assemblage des systèmes de guidage, ainsi que la construction de la structure principale.

Ensuite, nous avons abordé la mise en œuvre de la partie électrique et informatique, intégrant les composants nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système. Cette phase a été cruciale pour garantir l'interaction harmonieuse entre les différents éléments mécaniques et les systèmes de contrôle.

Enfin, nous avons discuté de la génération du G-code, l'étape finale avant la découpe des pièces. La préparation minutieuse de ce langage de programmation a été essentielle pour assurer la précision et la qualité des découpes réalisées par la machine.

En résumé, ce chapitre a illustré l'importance d'une approche méthodique et intégrée pour réaliser avec succès notre projet, depuis la conception et la fabrication mécanique jusqu'à l'intégration électronique et informatique, pour finalement parvenir à une exécution précise et efficace grâce à la génération appropriée du G-code.

Conclusion générale

Notre projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre des études relatives aux machines de découpe CNC à fil chaud. Il met dans un premier temps en lumière leur fonctionnement, leurs applications, et les avantages qu'elles offrent par rapport à d'autres méthodes de découpe. Cette méthode se distingue par le fait qu'elle est une solution polyvalente, précise et économique, particulièrement efficace pour des matériaux tels que les mousses synthétiques.

Nous avons ensuite étudié différentes architectures de machines de découpe à fil chaud (MDFC), ce qui nous a permis de bien comprendre les solutions technologiques utilisées. Sur cette base, nous avons entrepris la conception de notre propre machine à quatre axes, en passant par une analyse fonctionnelle rigoureuse et la sélection des solutions technologiques adéquates. Nos choix se sont révélés efficaces, garantissant un fonctionnement optimal et sécurisé du système.

La mise en œuvre de notre projet a inclus la fabrication des pièces par impression 3D, l'assemblage des systèmes de guidage, et la construction de la structure principale, ainsi que l'intégration des composants électriques et informatiques. Cette intégration a été cruciale pour assurer une interaction harmonieuse entre les éléments mécaniques et les systèmes de contrôle. Enfin, la génération précise du G-code a été essentielle pour garantir la qualité des découpes réalisées.

En somme, ce travail illustre l'importance d'une approche méthodique et intégrée, depuis la conception initiale jusqu'à l'exécution finale, pour réussir la réalisation d'une machine de découpe à fil chaud CNC. Nous avons démontré que, grâce à une planification minutieuse et à l'utilisation de technologies adaptées, il est possible de concevoir et de fabriquer une machine efficace et fiable, capable de répondre aux exigences de la fabrication moderne.

Bibliographie

- [1] : “Les Différentes Techniques De Découpe De Mousse.” n.d. JPJ Mousse. <https://www.jpj-mousse.fr/decoupe-de-mousse-elles-sont-les-differentes-techniques/>.
- [2] : Cncfab, Renaud Iltis -. n.d. “CNC Fil Chaud De Type MC4X : Caractéristiques Et Commande.” <https://cncfab.renaudiltis.com/mc4x>.
- [3] : MrSEO. 2023. “Qu’est Ce Que Polystyrène Extrudé (XPS) ? - Lettre Polystyrene.” Lettre Polystyrene. October 3, 2023. <https://www.lettre-polystyrene.fr/news/quest-ce-que-polystyrene-extrude-xps/>.
- [4] : Fenêtres, Pro. 2022. “La Mousse Polyuréthane Expansive, C’est Quoi ?” Rénovation De Votre Habitat, Travaux Et Bricolage. July 5, 2022. <https://www.maisontravaux.fr/mousse-polyurethane-expansive/>.
- [5] : “Polystyrène Expansé : Un Isolant Efficace Et Pas Cher - Conseils Thermiques.” n.d. <https://conseils-thermiques.org/contenu/polystyrene-expansive.php>.
- [6] : “Mousse Caoutchouc SE25M1CC.” n.d. <https://www.solutions-elastomeres.com/fr/mousse-caoutchouc/103-mousse-classee-feu-caoutchouc.html>.
- [7] : “Coupe Polystyrène À Fil Chaud 3-en-1.” n.d. E44. <https://www.e44.com/outillage/outillage-a-main/outils-decoupe/coupe-polystyrene/coupe-polystyrene-fil-chaud-3-en-1-VTFC2.html>.
- [8] : TBVECHI Hot Wire Foam Cutting Machine, Table Top Styrofoam Cutter for Cutting Foam, Sponge, Pearl Cotton, Kt Board : Industrial & Scientific.” n.d. <https://www.amazon.com/Cutting-Machine-TBVECHI-Working-Styrofoam/dp/B07R16SWJD>.
- [9] : “Hot Wire Cutter for Cutting Polystyrene Depron EPP Eps Xps Free Cut Circle Jig.” n.d. <https://www.ebay.co.uk/itm/253160438428>.
- [10] : lin, zim. 2020. “Home - ZIMLIN.” Mattress Machinery. July 23, 2020. <https://www.zimlin.com>.
- [11] : “Sign Hot Wire CNC Foam Cutters | Sunnyvale, CA | Foamlinx.” n.d. Foamlinx. <https://www.foamlinx.com/hot-wire-cnc-sign-cutters>.
- [12] : Brooks, Hadley. 2009. Plastic Foam Cutting Mechanics for Rapid Prototyping and Manufacturing Purposes.
- [13] : Keith. 2019. “CNC Foam Cutters Builders Gallery.” RckKeith. September 13, 2019. <https://rck Keith.co.uk/builders-gallery/>.
- [14] : Keith. 2024. “How to Build a Hot Wire CNC Foam Cutter – Parallel Port Version.” rckKeith. May 5, 2021. <https://rck Keith.co.uk/cnc-hot-wire-foam-cutter/>.
- [15] : Kg, Norelem Normelemente. n.d. “Vis À Billes Roulée Avec Écrou À Collerette DIN 69051 Partie 5 | Norelem.” Norelem Normelemente KG. <https://www.norelem.com/be/fr/Produits/Vue-d-ensemble-des-produits/Syst%C3%A8mes-et-composants-pour-la-construction-de-machines-et-d-installations-techniques/24000-Vis-%C3%A0-filet-trap%C3%A9-%C3%A9-%C3%A0-billes-Unit%C3%A9s-de-palier/Vis-d-entra%C3%A9nement-%C3%A0-bille-et-unit%C3%A9s-de-palier/24055-Vis-%C3%A0-billes-roul%C3%A9e-avec-%C3%A9-%C3%A0-crou-%C3%A0-collerette-DIN-69051-partie-5.html>.
- [16] : Gradel-Baudin. 2022. Vis À Billes Roulées. Gradel-Baudin. <https://www.gradel-baudin.fr/product/vis-a-billes-roulees/>.
- [17] : 1, Prestashop. n.d. “Moteur Pas à Pas 17HS4401 12V NEMA17 200 Pas/Rev 1.7A - Boutique Semageek.” <https://boutique.semageek.com/fr/1443-moteur-pas-a-pas-17hs4401-12v-nema17-200-pasrev-17a-3005762453528.html>.
- [18] : « Guide du Dessinateur Industriel » Authors: André Chevalier, Bernard Dubuis/Publisher: Hachette Technique/ISBN: 978-2011816431
- [19] : “Cdiscount.com.” n.d. CDiscount. <https://www.cd Discount.com/bricolage/quincaillerie/rail-de-guidage-lineaire-vevor-2-x-sbr16-500mm/f-16603-vev0617201462683.html>.

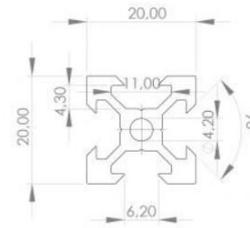
- [20]: Dejan. 2023. "Arduino CNC Foam Cutting Machine." How to Mechatronics. November 28, 2023. <https://howtomechatronics.com/projects/arduino-cnc-foam-cutting-machine/>.
- [21]: "Pnloog - Réduction De La Poulie De Distribution 3:1/1:3, Largeur De Courroie 6 Mm Alésage 5/10 Mm, Poulie De Courroie GT2 60 Dents 20 Dents Pour Imprimante 3D Diamètre D'alésage : 20T5 60T8 280 Mm : Amazon.ca: Commerce, Industrie Et Science." n.d. <https://www.amazon.ca/-/fr/Pnloog-R%C3%A9duction-distribution-courroie-imprimante/dp/B09FJ4MYZY>.
- [22]: Gates Khb. 2005. "Gates KHB Poly Chain® GT2," January 2005. www.gates.com/europe/polychain
- [23]: "Integrated Closed Loop Stepper Motor ." 2018. StepIM 5.2: 3. <https://www.servotronix.cn/en>
- [24]: "Notion Sur Le Calcule Des Roulements." 2015. Www.zpag.net. 2015. https://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Roulement_notion_calcule.htm.
- [25]: « dimensionnement des organes » Dr. ouali. Université Saad dahleb Blida 1 2022/2023.
- [26]: SKF. 2019. "Roulements SKF," July 2019. BU/P1 17000/1 FR. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968094ddb3/pdf_preview_medium/skf.com
- [27]: FLI. 2019. "Douilles À Billes Ball Bushing," July 2019. <http://www.upk1.ru/f/sharikovyvelineynyepodshipnikifli.pdf?fbclid=IwAR3VnBTrij%20KaB0jQhxoVUndsTYCeVQscs7LaYzQmMS7oC6y-skl-yxeRul>.

Annex

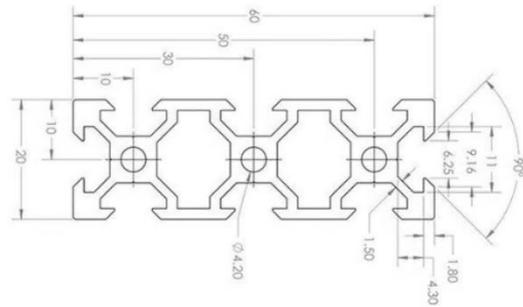
- **Matériaux:**

1- Aluminum profiles:

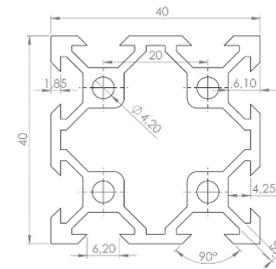
- Profile dimension: 20x20mm
- Type de profile: V-slot
- number emplacements: 4
- Longueur: 1000mm
- Diameter de perçage: 4.5mm
- Prix: 1200 DA/m



- Profile dimension: 20x60mm
- Type de profile: V-slot
- number emplacements: 8
- Longueur: 500mm
- Diameter de perçage: 4.5mm
- Prix: 2700 DA/m



- Profile dimension: 40x40mm
- Type de profile: V-slot
- number emplacements: 8
- Longueur: 600mm
- Diameter de perçage: 4.5mm
- Prix: 4200 DA/m



2- Roulement lineaire:

Specification:

- Diameter interieur: 8mm
- Diameter extérieur: 15mm
- Longueur: 24mm
- Masse: 13g
- Prix: 400 DA



3- Tige:

Specification:

- Form de la tige: round
- Diameter: 8mm
- Prix: 1300 DA/m



4- Accouplement flexible:

Specification:

- Diameter interieur: 5/8mm
- Diameter extérieur: 19mm
- Longueur: 19mm
- Prix: 400 DA



5- support de guidage d'arbre linéaire:

specification:

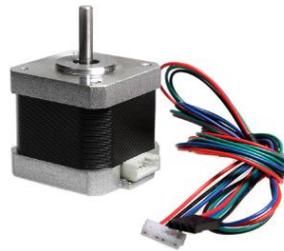
- diameter de guidage linéaire: 8mm
- hauteur: 32.8mm
- longueur: 42mm
- vis: M4
- masse: 24g
- prix: 450 DA



6- moteur pas a pas:

specification:

- Tension nominale: 12V DC.
- Courant: 1,2A à 4V.
- Angle de pas: 1,8 degrés.
- Nombre de phases: 4.
- Longueur du moteur : 1,54 pouces.
- Fil à 4 conducteurs, longueur de 8 pouces.
- 200 pas par révolution, 1,8 degrés.
- Température de fonctionnement : -10 à 40 °C.
- Prix: 3400 DA



7- Poullie GT-2:

Specification:

- Utilisation pour courroie synchrone GT2 6 mm de large
- Matériau : Alliage d'aluminium
- Diamètre : 5 mm
- Quantité de dents : 20 (T)
- Pas : 2 mm
- Largeur de la courroie : 6 mm
- Couleur : argent
- Prix : 300 DA



8- Courroie :

Specification:

- GT2 (GT2-2M)
- Courroie unilatérale
- Longueur: vendue au pied (jusqu'à 100 pieds)
- Pas: 2mm
- Largeur de la courroie : 5mm
- Élément de tension: Fibre de verre
- Couleur : Noir
- Prix : 600 par mètre

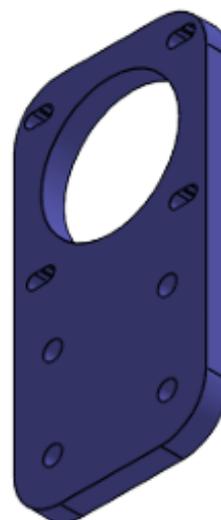
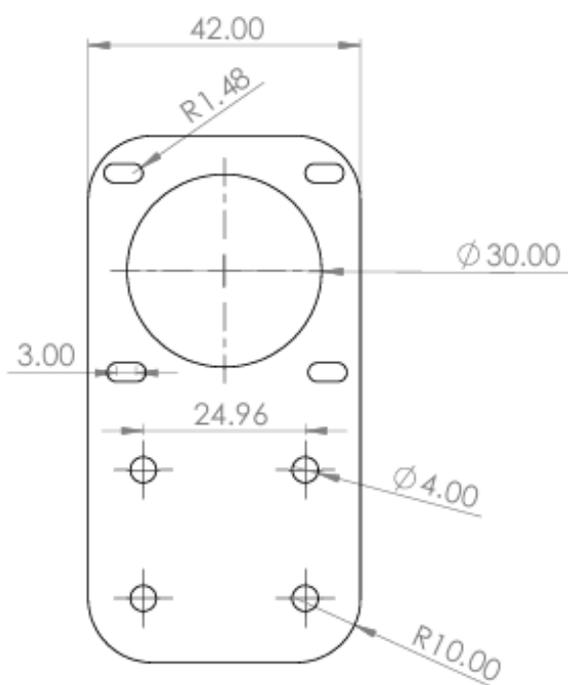


9- Boulon M4:

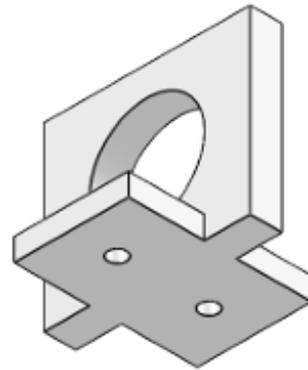
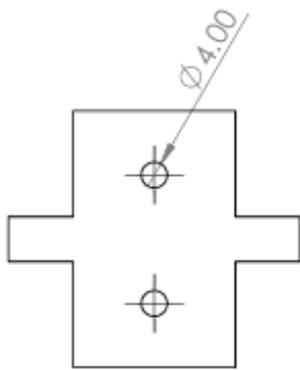
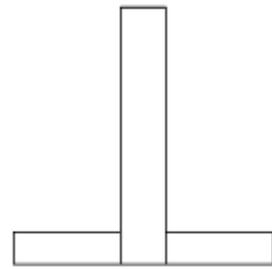
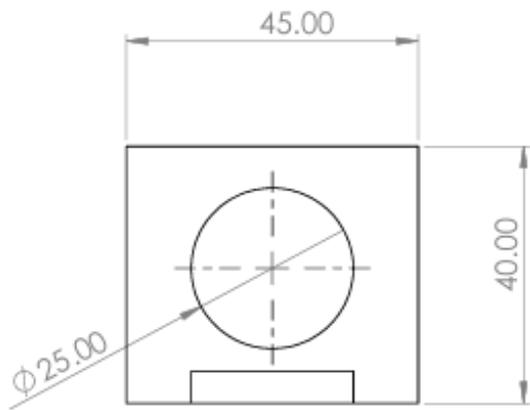
Specification:

- Diameter vis/ecrou: 4mm
- Pas: 1mm
- Prix: 50DA per 10 boulons





scale: 1:2	SAAD DAHLEB BLIDA 1	13/05/2024
 	support moteur l'axe X	RAMOUL Hamza
format: A4		



scale: 1:2

SAAD DAHLEB BLIDA 1

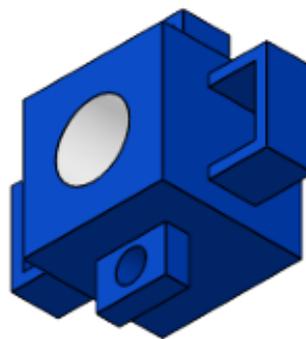
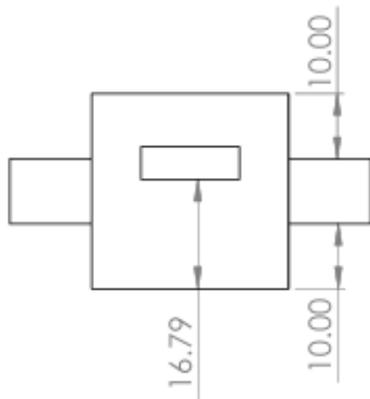
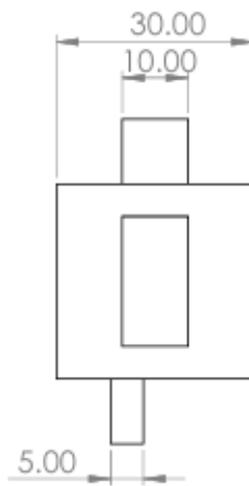
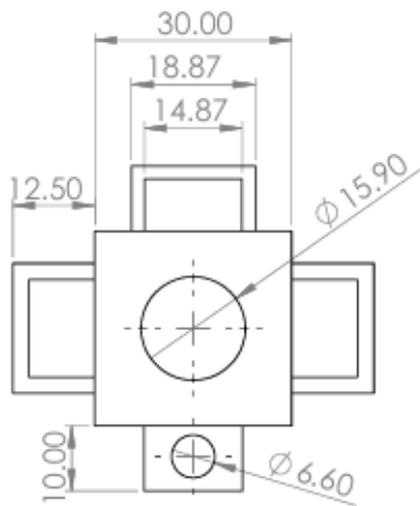
13/05/2024



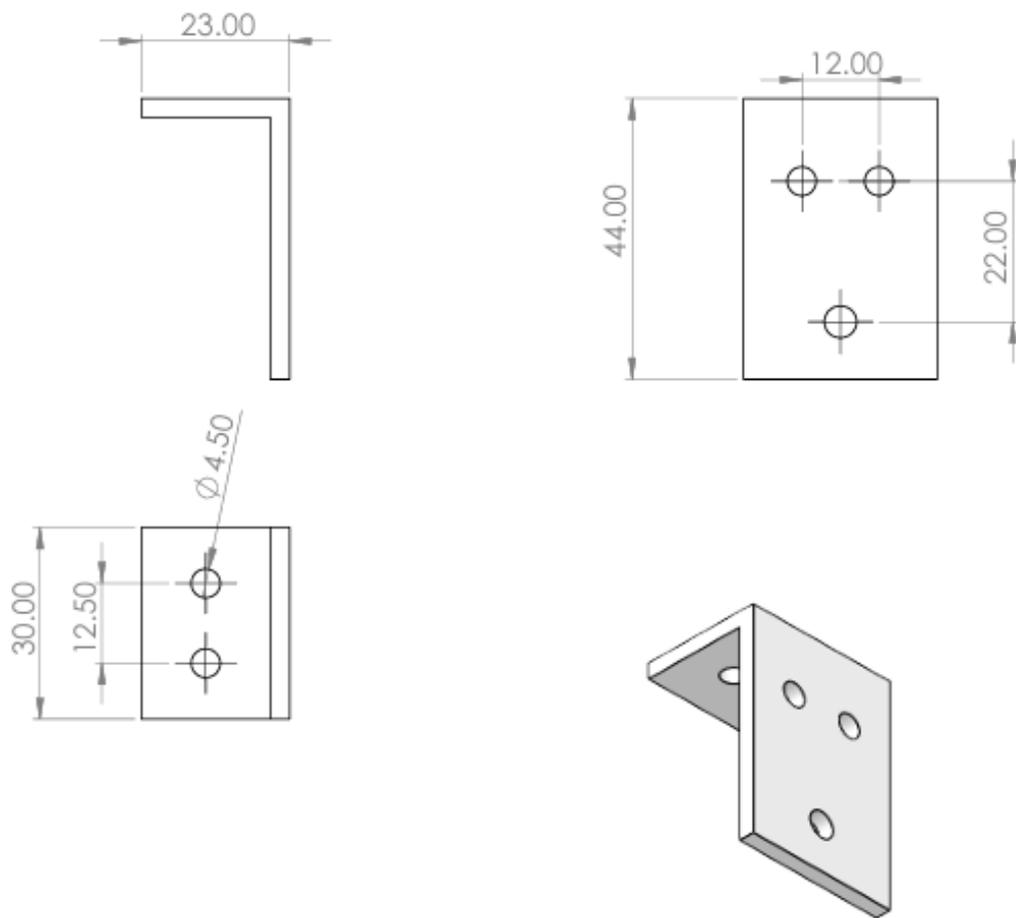
format: A4

support de roulement

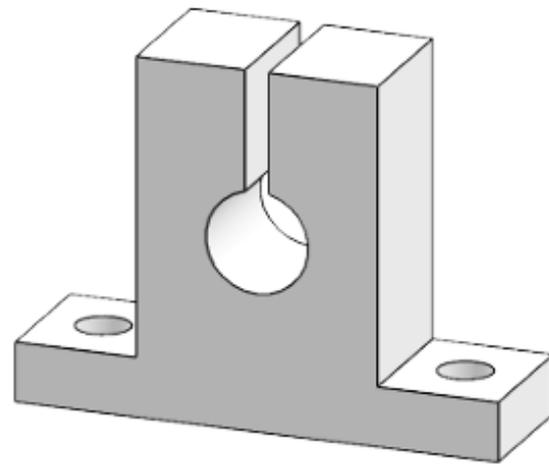
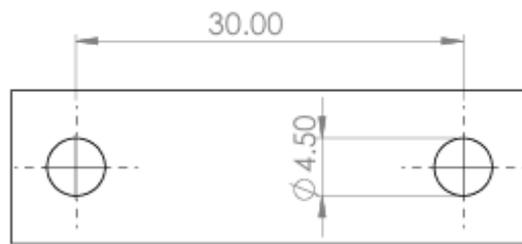
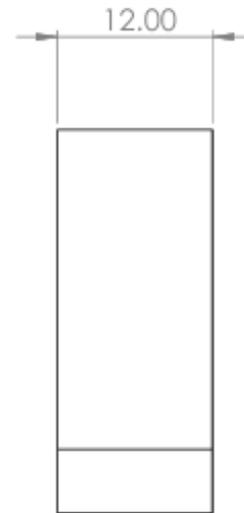
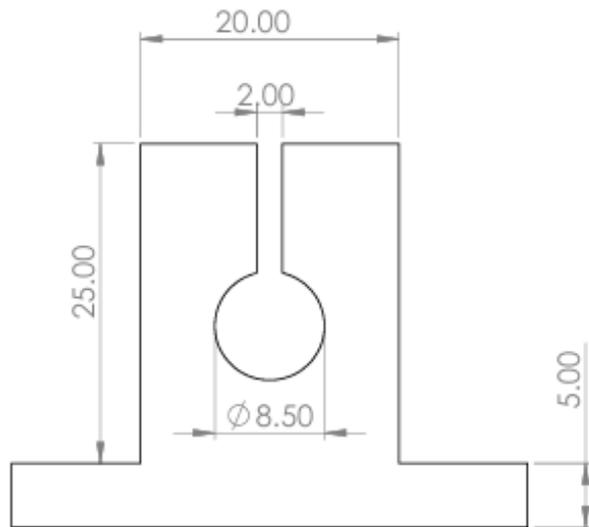
RAMOUL Hamza



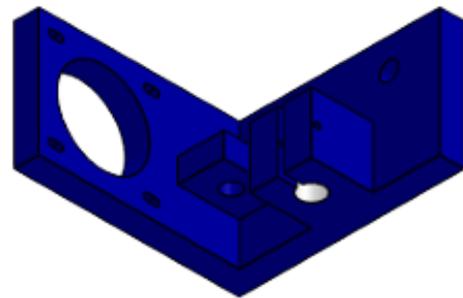
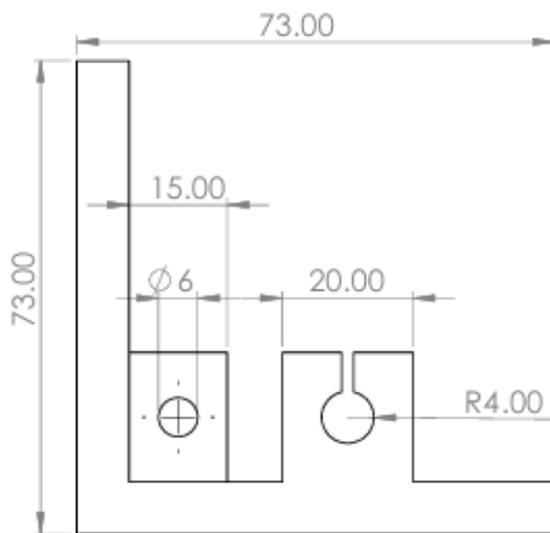
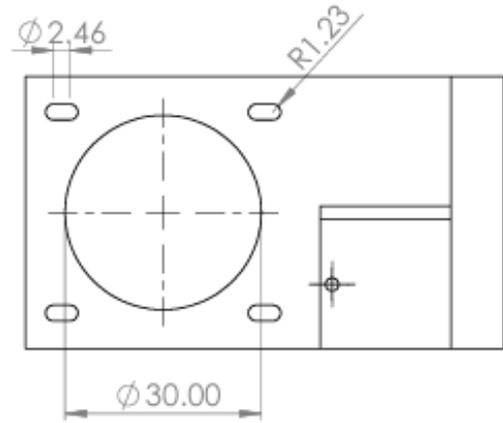
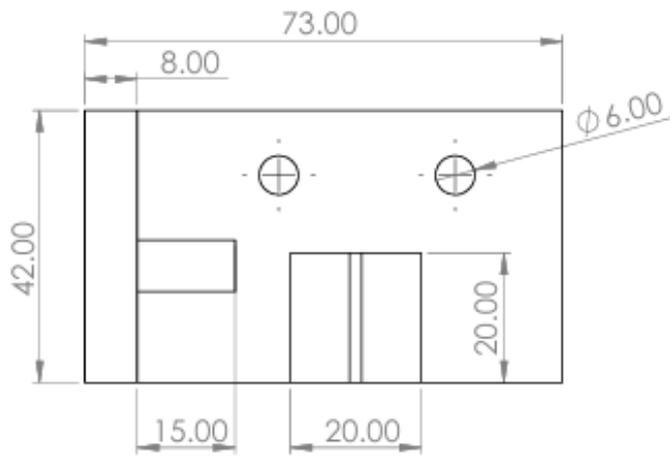
scale: 1:2	SAAD DAHLEB BLIDA 1	M2 FMP
	support de fil	13/05/2024
Format: A4		RAMOUL Hamza



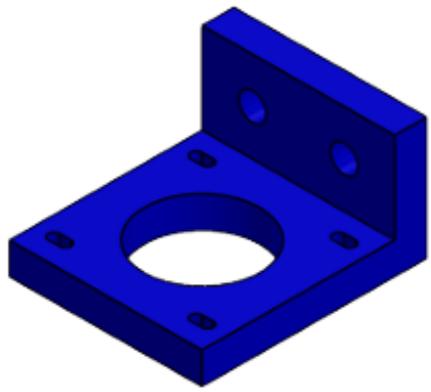
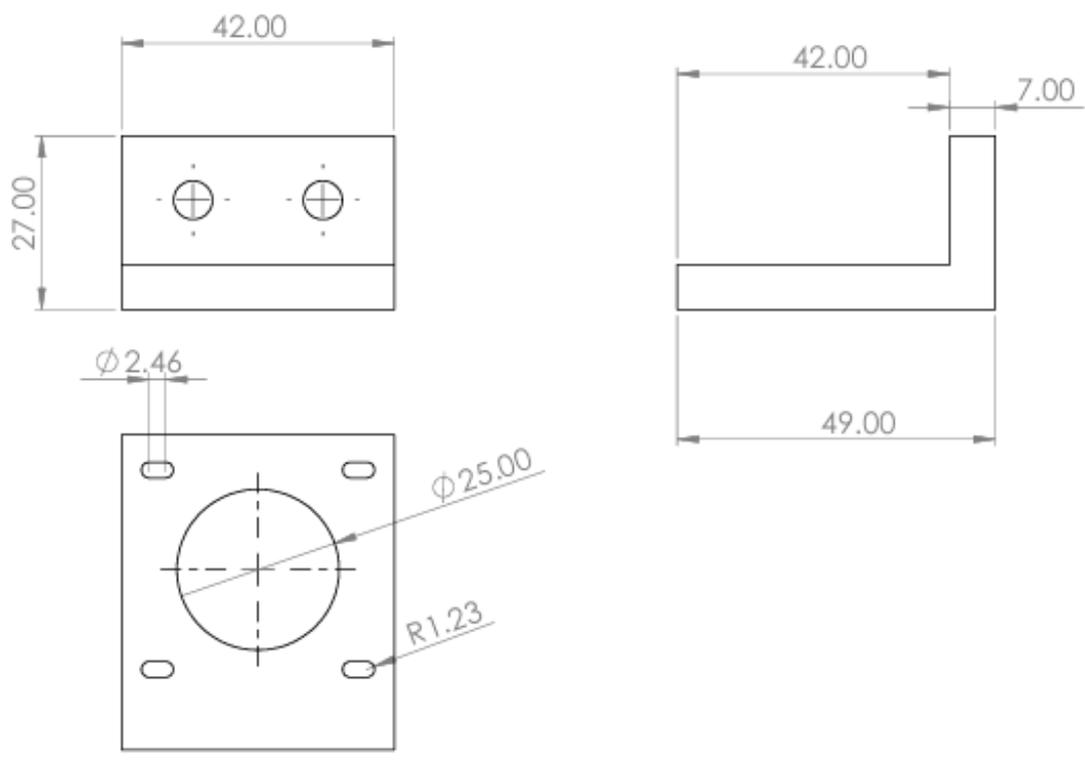
scale: 1:2	SAAD DAHLEB BLIDA 1	13/05/2024
	support de poulie	M2 FMP
		RAMOUL Hamza
format: A4		



scale: 1:2	SAAD DAHLEB BLIDA 1	M2 FMP
	Support de TIGE	13/05/2024
format: A4		RAMOUL Hamza

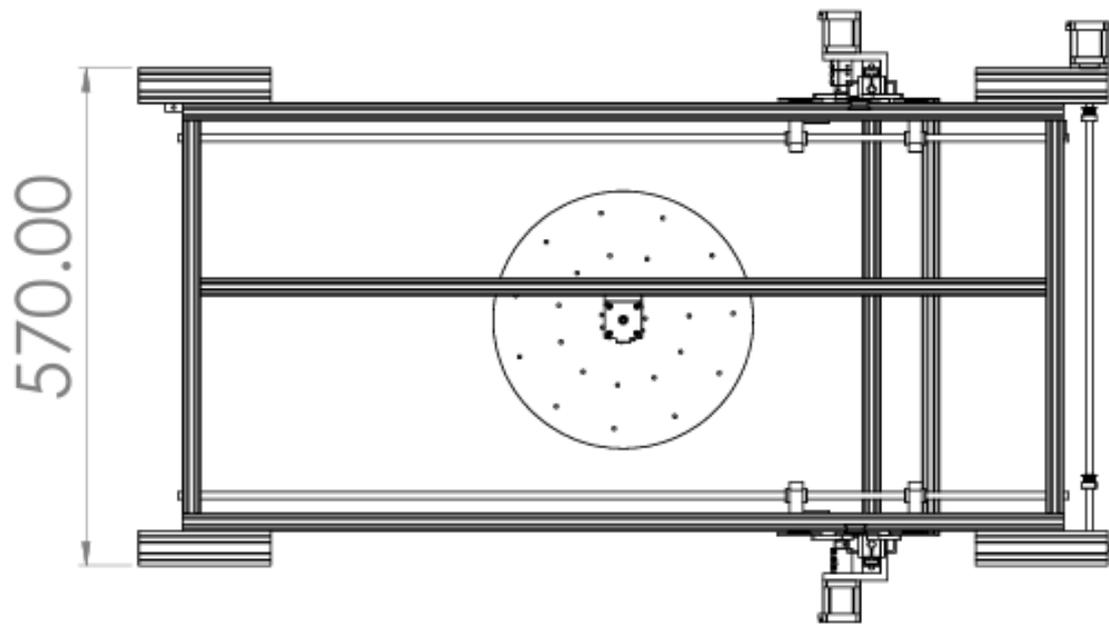
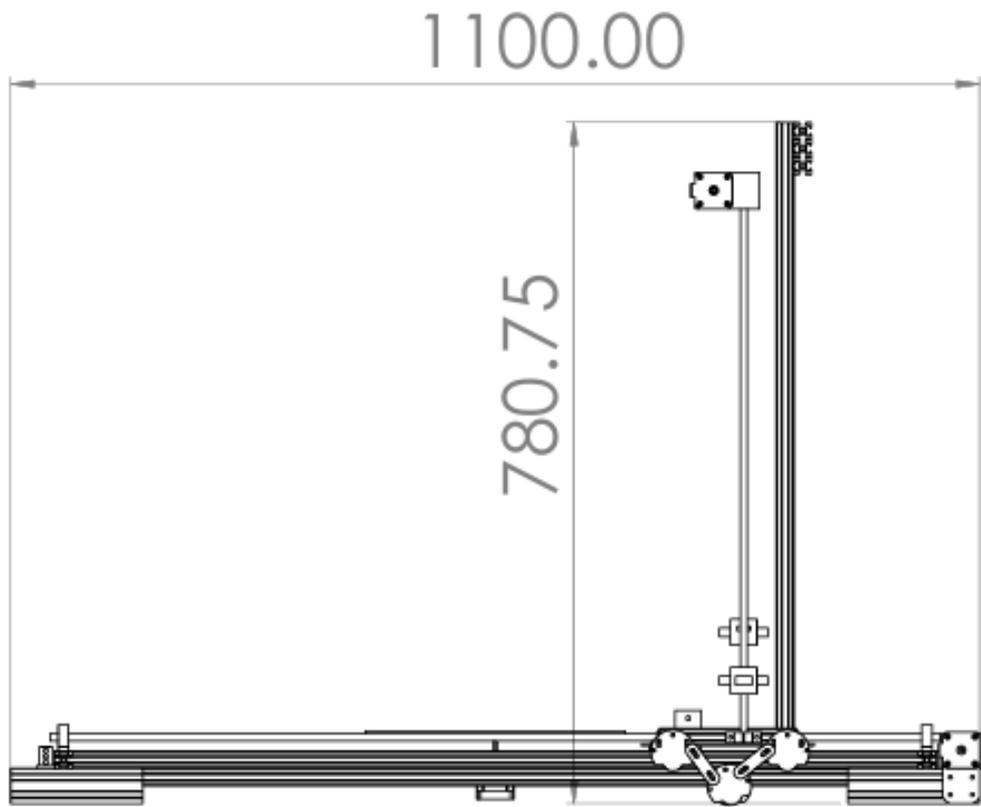


scale: 1:2	12/05/2024	M-2 FMP	MAT : PLA
 	SAAD Dahleb B-1-		RAMOUL Hamza
format: A4	Support moteur l'axe Z		



scale: 1:2	SAAD DAHLEB BLIDA 1	RAMOUL Hamza
	support de moteur de la table rotative	13/05/2024
format: A4		M2 FMP

N° ARTICLE	N° DE PIECE	QTE
1	Aluminum profile 2020 1m	2
2	Aluminum profile 4040 150mm	4
3	Aluminum profile 2020 400mm	2
4	Aluminum profile 2020 80mm	4
5	Support de tige	4
6	Tige 8mm L1010mm	2
7	LM8UU	4
8	Support moteur de l'axe x	1
9	Accouplement	1
10	Tige 8mm L500mm	1
11	Poulie GT-2	2
12	Support de tige	1
13	Roulement 8mm	1
14	NEMA 17	1
15	Aluminium profile 2020 695mm	2
16	Support de moteur	1
17	Aluminium 2020 596mm	1
18	Tige 8mm L600mm	2
19	Support de moteur	1
20	NEMA 17	2
21	Acoouplement	2
22	Poulie GT-2	4
23	Support de fil	2
24	LM8UU	2
25	Support de tige	2
26	Aluminum profile 2020 150mm	2
27	Support de courroie	4
28	Roue	6
29	Support de poulie	2
30	Aluminium profile 2060	1
31	Support moteur de la table rotative	1
32	NEMA17	1
33	Table	1
34	Aluminum profile 2020 1m	1



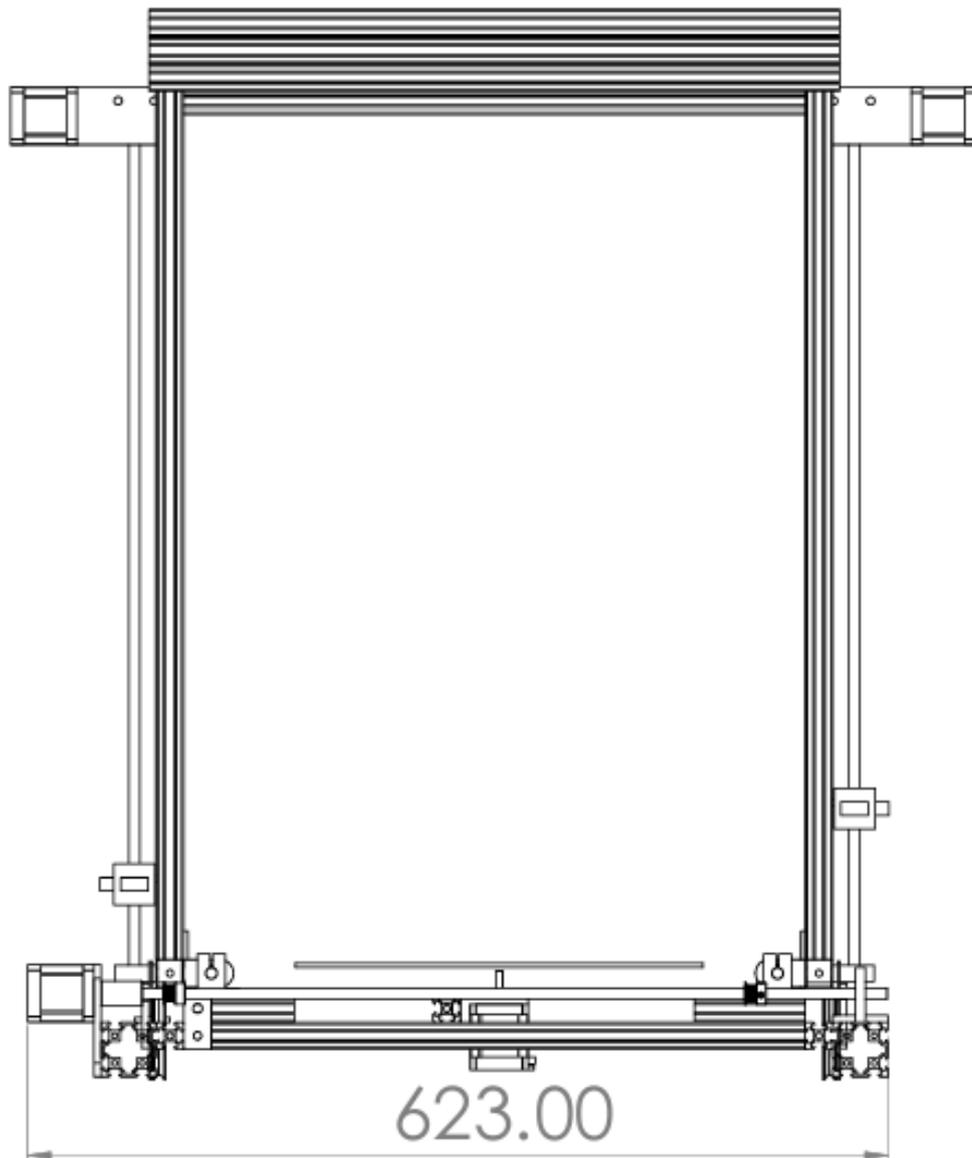
scale: 1:8

RAMOUL Hamza

MDFC

13/05/2024

M2 FMP



scale: 1:5

RAMOUL Hamza

MDFC

13/05/2024

M2 FMP