



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Électromécanique.

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique.

Spécialité : Maintenance Industrielle et
Électromécanique.

Thème

**LA SIMULATION ET LA RÉALISATION DE LA MACHINE
À CONTRÔLE .**

Présenté et soutenu publiquement par :

Mazed Said & Djemai Ali.

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. B. BELKACEM	MCA	IMSI	Président
Mr. B. Bouaidjra Bachir	MCA	IMSI	Encadrant

Mr. A.Bouchaala	MCB	IMSI	Examineur
Mr. A.Abdelhamid	Ing.	/	Représentant Partenaire Socio-économique

2024/2025

ملخص

تعتبر ماكينات التحكم الرقمي من الأدوات الأساسية في الصناعات الحديثة، حيث تُستخدم بشكل رئيسي في خطوط الإنتاج بفضل دقتها وجودتها العالية. في هذا المشروع، قمنا بتصميم وبناء آلة بثلاثة محاور قادرة على إجراء عمليات القطع أو الثقب على مواد مثل البلاستيك والخشب. نظراً لارتفاع تكلفة محرك القطع والثقب، قمنا باستبداله بثاقبة، واستخدمنا بطاقة ماك 3 كنظام تحكم، مع برمجة الآلة باستخدام لغة جي كود .

في البداية، قمنا بتوضيح بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بماكينات، وناقشنا برنامج ولغة البرمجة. عملياً، قمنا بتصميم وبناء النموذج وأجرينا عليه العديد من التجارب، وكانت النتائج إيجابية ومباشرة.

Résumé :

Les machines CNC jouent un rôle primordial dans les industries modernes, reconnues pour leur précision et la qualité de leur production. Ce projet vise à concevoir et à construire une machine CNC à trois axes, destinée à effectuer des découpes ou du fraisage, avec la possibilité de travailler sur des matériaux tels que le plastique et le bois. Cependant, en raison du coût élevé du système CNC et du moteur de broche CNC, une perceuse a été choisie comme alternative, et la carte Mach3 a été retenue pour le système de contrôle.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes fondamentaux des machines CNC, du logiciel Mach3 et du langage de programmation G-CODE. Ensuite, nous avons conçu et fabriqué le modèle, réalisé des essais et obtenu des résultats satisfaisants et prometteurs.

Abstract :

CNC machines play a crucial role in modern industries, recognized for their precision and production quality. This project aims to design and build a three-axis CNC machine intended for cutting or milling operations, capable of working with materials such as plastic and wood. However, due to the high cost of CNC systems and the CNC spindle motor, a hand drill was chosen as an alternative, and the Mach3 controller board was selected for the control system.

We first introduced the fundamental principles of CNC machines, the Mach3 software, and the G-code programming language. Subsequently, we designed and built the model, conducted tests, and achieved satisfactory and promising results.



Remerciements

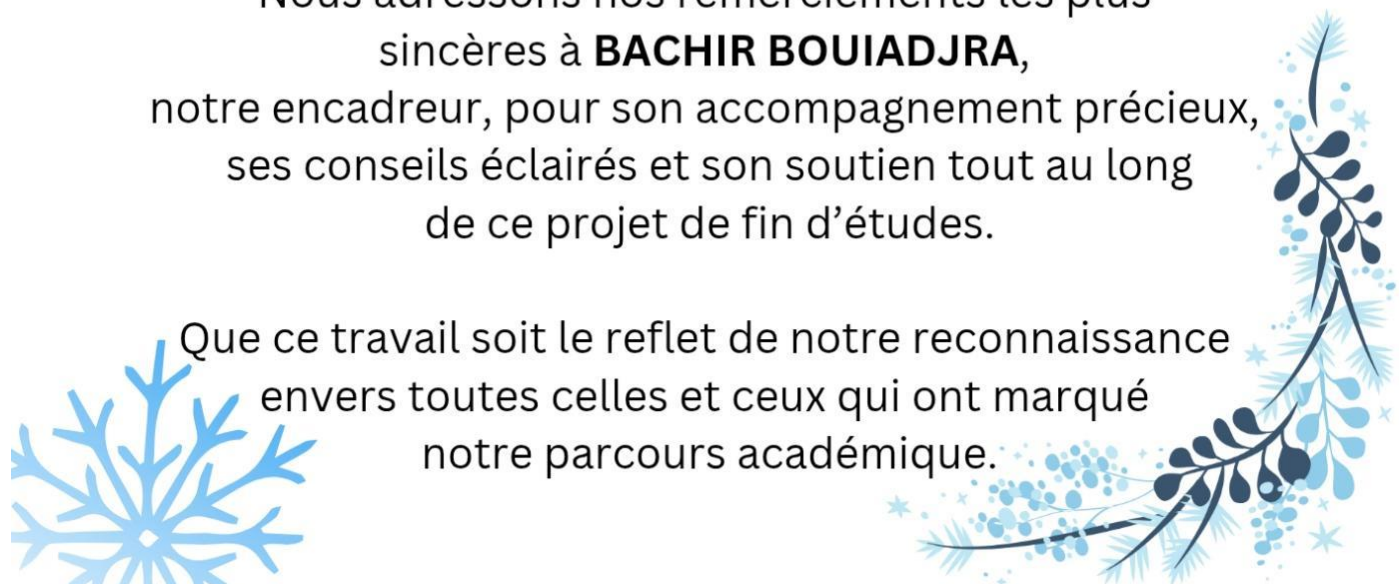
Après avoir rendu grâce à Dieu, le Tout-Puissant,
qui nous a guidés et soutenus tout au long de ce parcours,
nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents, dont l'amour incommensurable,
les sacrifices et le soutien indéfectible ont été le
pilier de notre réussite .

À nos frères, sœurs et familles, qui nous ont toujours
encouragés et accompagnés avec bienveillance
ainsi qu'à nos amis, dont l'amitié sincère et le soutien
nous ont été précieux.

Nous exprimons également notre profonde gratitude
à toutes les personnes qui, de près ou de loin,
ont contribué à la réalisation de ce travail par leurs conseils,
leur patience et leur générosité.

Nous adressons nos remerciements les plus
sincères à **BACHIR BOUIADJRA**,
notre encadreur, pour son accompagnement précieux,
ses conseils éclairés et son soutien tout au long
de ce projet de fin d'études.



Que ce travail soit le reflet de notre reconnaissance
envers toutes celles et ceux qui ont marqué
notre parcours académique.

Introduction Générale :

Les machines à commande numérique par ordinateur (CNC) jouent un rôle fondamental dans la modernisation de la production industrielle, en offrant une grande flexibilité, une précision accrue et une automatisation avancée des processus. Ces dernières années, le domaine du contrôle des machines électriques a connu des avancées significatives, rendues possibles grâce aux progrès rapides de l'électronique de puissance et de l'informatique industrielle.

La révolution industrielle a commencé par la création d'outils destinés à l'industrie traditionnelle. Ces outils ont progressivement évolué vers des machines semi-automatiques, puis vers des machines entièrement automatisées, pilotées par ordinateur à l'aide de programmes spécifiques. Ces programmes permettent de transmettre les instructions depuis la partie commande vers la partie opérationnelle de la machine. L'apparition de cartes électroniques programmables, telles que l'Arduino, les DSP (Digital Signal Processors, ou processeurs de signaux numériques) ou encore les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays, ou réseaux de portes programmables sur le terrain), permet aujourd'hui de contrôler pratiquement n'importe quel système, y compris les machines CNC.

Dans le cadre de notre projet, nous avons conçu une machine CNC à 3 axes, capable d'usiner divers matériaux. Elle est pilotée par une carte électronique programmable, fonctionnant avec le logiciel Mach3, en lien avec des contrôleurs de moteurs pas à pas de type TMC2209.

La réalisation de ce projet s'articule autour de trois chapitres :

Le **chapitre I** présente un aperçu général des machines-outils à commande numérique ainsi que leur structure.

Le **chapitre II** est consacré à l'étude de la commande et de l'architecture informatique des machines CNC.

Le **chapitre III**, divisé en deux parties, aborde d'une part la conception mécanique et électrique de la machine (notamment à l'aide des logiciels SolidWorks et EASYEDA), et d'autre part la mise en œuvre et le test d'un usinage simple réalisé dans le cadre de ce projet.

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralité sur les machines à commande numérique par Ordinate

I. Introduction	1
I.2. Historique de commande numérique.....	1
I.3. Définition de la commande numérique	2
I.4. Définition du machine CNC:.....	3
I.5. Domaine d'application des machine CNC	4
I.6. Principe de fonctionnement des machines CNC.....	4
I.6.1. Création du programme CNC.....	4
I.6.2. Chargement et exécution du programme	4
I.6.3. Déplacements et usinage automatique.....	4
I.7 Classification des machines CNC.....	5
I.7.1 Classification selon les fonctions.....	5
I.7.2 Classification selon le type de mouvement.....	5
I.7.3 Classification selon le nombre d'axes.....	6
I.7.4 Classification selon la méthode de contrôle.....	6
I.7.5 Classification selon l'alimentation.....	6
Chapitre II : La commande de la machine CNC.....	8
II.1. Introduction :	9
II.2. Moteur pas à pas :	10
II.2.1. Introduction :	10
II.2.2. Types et principe de fonctionnement des moteurs pas à pas	10
II.2.2.1. Moteur pas à pas à réluctance variable.....	11
II.2.2.1.1. Constitution:.....	11
II.2.2.1.2. Fonctionnement:.....	11
II.2.2.2. Moteur pas à pas hybride :	12
II.2.2.2.1. Constitution :	12
II.2.2.2.2. Fonctionnement :	13
II.2.2.3. Moteur à aimant permanent :	13
II.2.2.3.1. Constitution :	13
II.2.2.3.1.1. Mode méthode d'entraînement par onde (Wave Drive ou One-phase-on) :	14
II.2.2.3.2. Mode Plein Pas (Full Step)	15
II.2.2.3.3. Mode Demi-Pas (Half Step).....	16
II.2.2.3.4. Mode Micro-Pas (Microstepping).....	16
II.2.2.4. Taille et Puissance des Moteurs Pas à Pas :	17
II.2.2.5.1. Caractéristiques dynamiques.....	17
II.2.2.5.3. Influence de la Charge.....	18
II.2.2.5.4. Caractéristiques du Couple en Fonction de la Vitesse :	19
II.2.2.5.5. Avantages des moteurs pas à pas :	20
II.2.2.5.6. Inconvénients:	20
II.2.2.5.7. Applications Des moteur pas à pas :	20
II.3. La carte Mach3.....	21
II.3.1. Introduction	21

II.3.2. Fonctionnement de Mach3	21
II.3.4. Le rôle de Mach3.....	23
II.3.5. Modes opératoires de Mach3	24
II.3.5.1. Mode manuel (Jogging)	24
II.3.6.2.1. Définition des adresses du port	26
II.4. G-code	29
II.4.1. Introduction	29
II.4.2. Structure d'un programme	30
II.4.4. Logiciel de dessin (Aspire Vectric) :	35
II.4.4.1 Présentation de l'interface	36
II.4.5. Conclusion :	37
Chapitre III :conception et simulation d'une machine CNC.....	38
III.1. Introduction :	39
III.2.1. Les composants mécaniques :	39
III.2.1.2. Accouplement :	39
III.2.1.3. Glissière	40
III.2.1.4. Rail.....	40
III.2.1.5. Tige filetée.....	41
III.2.2. Les composants électriques.....	42
III.2.2.1. Caractéristiques de la Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2	42
III.2.2.2. Les pilotes :	45
III.2.2.2.1. Les Caractéristiques DRV8825 :	45
Contrôle Avancé du Microstepping	45
Gestion Robuste de l'Alimentation et du Courant	45
Fonctionnalités de Protection Complètes.....	45
III.2.2.2.2. Les Caractéristiques de A4988 :	46
III.2.2.2.3. Les Caractéristiques de TB6600 :	47
III.2.2.2.4. Les Caractéristiques TMC2209 :	47
III.2.2.2.5. Pourquoi Choisir le TMC2209 ?	48
III.2.2.4. L'Alimentation :	56
III.2.2.5. Fin de course	57
III.2.2.6. Bouton d'arrêt d'urgence	59
III.2.2.7. Le Relais électromagnétique.....	61
III.2.2.8. La broche :	60
III.3. Eléments et caractéristiques de la partie commande.....	63
III.3.1. Circuit d'interface	61
III.4. Simulation Mécanique sous SOLIDWORKS de la machine CNC.....	66
III.4.1 Introduction.....	64
III.4.2 Description du logiciel « SOLIDWORKS ».....	64
III.4.3 Partie pièce.....	65
III.4.3.4. Moteur pas à pas	69
III.4.3.6. Vis filée (tige) :	70
III.4.3.7. Écrou	71
III.4.3.8. Support de vis sur l'axe Y et Z	72
III.4.3.9. Support de vis sur l'axe X.....	72
III.4.3.9. Support de vis sur l'axe X.....	75

III.4.3.10. Support outil.....	76
III.4.4. Partie de l'assemblage.....	76
III.6.La réalisation de la machine CNC.....	85
III.6.2. La réalisation de l'axe X.....	86
III.6.3. La réalisation de l'axe Y.....	86
III.6.4. La réalisation de l'axe Z.....	87
III.6.5. La réalisation de l'axe X,Y.....	87
III.7 Conclusion	88
Les Références Bibliographiques	94

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: permet les premières machines CNC en 1949	2
Figure I.2: Usinage 3 axes	5
Figure I.3: Usinage 4 axes.....	5
Figure II.1: Schéma de la structure de commande.....	10
Figure II.2: Plan de la conversion d'un Moteur pas à pas.....	11
Figure II.3: Fonctionnement d'un Moteur pas à pas (MPAP).....	12
Figure II.4: Constitution d'un MPAP hybride.....	13
Figure II.5: Moteur à aimant permanent	13
Figure II.7: Principe de fonctionnement du moteur Pas à pas en mode Plein pas.....	15
Figure II.9. Couple Dynamique en fonction du courant.....	18
Figure II.10. Couple maximal en fonction de la fréquence des pas.....	20
Figure II.11. la Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2	22
Figure II. 12 : Système de contrôle numérique.....	23
Figure II. 13 : interface de logiciel mach3	24
Figure II. 14 : MPG MODE.....	25
Figure II.15 : MDI INTERFAS.....	25
Figure II. 16 : Mode automatique.....	26
Figure II. 17 : Configuration unités.....	26
Figure II. 18 :configuration initial	27
Figure II. 19 :configuration ports pins.....	28
Figure II. 20 : Sorties Moteurs.....	28
Figure II. 21 :les signaux d'entrées.....	29
Figure II. 22 : les signaux de sorties.....	29
Figure II. 24 :Réglage et configuration du moteur.....	30
Figure II. 25 : configuration de la broche.....	30
Figure II. 26 :Programme G-Code	31
Figure II. 27 :Bloc de mise en rotaion.....	32
Figure II. 28 : Traduction G code.....	32
Figure II. 29 :Structure d'un G code	35
Figure II. 31 : Interface de Aspire Vectric	37
Figure III.1 :palier a roulement.....	36
Figure III.2 : Accouplement.....	37
Figure III.3 : glissière.....	40
Figure III.4 :Rail.....	41
Figure III.5 : Tige Filleté.....	41
Figure III.6 : La Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2	42
Figure III.7 : Schéma de connexion de base de la carte Mach 3.....	44
Figure III.8 : Schéma de connexion des moteurs pas à pas et du relais.....	45
Figure III.9 : Schéma de connexion de la broche	45
Figure III.10 : Schéma de connexion des fins de course	46
Figure III.11 : Pilote de Moteur Pas à Pas DRV8825.....	47
Figure III.12 : Pilote de Moteur Pas à Pas A4988	48
Figure III.13 : Pilote de Moteur Pas à Pas TB6600.....	49

Figure III.14 : Pilote de Moteur Pas à Pas TMC2209	50
Figure III.16 : Désignation des broches du pilote TMC2209.....	51
Figure III.17 : Moteur Pas à Pas.....	52
Figure III.18 : Schéma d'un système d'actionneur.....	53
Figure III.19 : Profil de vitesse trapézoïdal utilisé pour le contrôle du mouvement d'un moteur pas à pas ..	54
Figure III.20 : Vis à billes	55
Figure III.21 : un exemple sur la courbe couple/vitesse du moteur pas à pas.....	58
Figure III.22 : Le Bloc D'alimentation	59
Figure III.23 : Contact Fin de Course.....	59
Figure III.24 : Element de contact fin de course.....	60
Figure III.25 : Exemple d'utilisation.....	60
Figure III.26 : Bouton d'arrêt d'urgence	61
Figure III.27 : Symbole de BAU	62
Figure III.28 : Les composants du Relais électromagnétique	63
Figure III.29 : La Broche.....	63
Figure III.30: Le schéma Électrique	65
Figure III.31 : INTERFACE DE SOLIDWORKS	67
Figure III.32 : RAIL	68
Figure III.33 : Base de L'axe Y.....	68
Figure III.34 : Base de L'axe X.....	69
Figure III.35 : Base de L'axe Z.....	69
Figure III.36: Support axe X à cotée de moteur.....	70
Figure III.37 : Support axe X à cotée roulement.....	70
Figure III.38 : Support axe Y ET Z à cotée roulement.....	71
Figure III.39 : Support axe X,Y et Z à cotée de moteur.....	71
Figure III.40 : Moteur pas a pas.....	72
Figure III.41 : accouplement.....	72
Figure III.42 : Tige filletée.....	73
Figure III.43 : Ecrou.....	73
Figure III.44 : support de vis axe Y et Z	74
Figure III.45 : support de vis axe.....	74
Figure III.46 : support d'outil.....	75
Figure III.47 : Cadre de la machine.....	75
Figure III.48 : Assemblage sur l'axe Y.....	76
Figure III.49 : Assemblage sur l'axe X.....	76
Figure III.50 : Assemblage sur l'axe Z.....	77
Figure III.51 : L'assemblage finale.....	77
Figure III.52: réalisation de l'axe X.....	83
Figure III.53: réalisation de l'axe Y.....	84
Figure III.54: réalisation de l'axe Z.....	85
Figure III.55: réalisation de l'axe X,Y.....	85
Figure III.56 : La machine CNC.....	86
Figure III.57 : La réalisation de schéma électrique	

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Signification des Fonctions	31
Tableau 2 : Fonction préparatoire fréquemment utilisées	32
Tableau 3 : Signification des Fonctions auxiliaires	32
Tableau 4 : Mode des broches du pilote TMC2209	51
Tableau 5 : Paramètres de Micro-pas de TMC 2209 V1.2	51

LISTE DES ABREVIATION :

CN : commande numérique

MOCN : machine-outil commande numérique

CNC : commande numérique par ordinateur

MIT : Millvale Industrial Theatre IBM: international business machines

3D : Trois dimensionnel

CAO (CAD en anglais) : conception assistée par ordinateur

FAO (CAM en anglais) : Fabrication assistée par ordinateur PO : Partie opérative

MPAP : moteur pas à pas

MPG : générateur d'impulsion manuel

DIR : direction

COM : Common output mode

PAS : Palse (pas)

PID : proportional integral derivative

MDI : Manual Data Input

PCI : parallel card

DNC : Direct Numerical Control

PCB : Printed circuit board

TBT : Très base tension

FPGA : Field-Programmable Gate Array

DSP : Digital Signal Processor

SMPS : Switched-Mode Power Supply, ce qui se traduit en français par alimentation à découpage.

Chapitre I :

Généralité sur les machines à commande
numérique par Ordinat

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer les bases des machines à commande numérique (CNC), qui jouent un rôle essentiel dans l'usinage moderne et plus largement dans la fabrication industrielle. Nous commencerons par définir précisément ce qu'est la commande numérique, en expliquant comment elle a révolutionné le contrôle automatisé des machines-outils grâce à des instructions programmables. Ensuite, nous présenterons les machines CNC dans leur ensemble, en détaillant leurs composants principaux ainsi que les technologies qui permettent leur fonctionnement précis et fiable. Nous examinerons également leurs principaux domaines d'application à travers divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, la médecine ou encore l'électronique, où ces machines assurent la production de pièces complexes avec une grande précision.

Par la suite, nous expliquerons en détail le principe de fonctionnement des machines CNC, depuis la conception assistée par ordinateur (CAO) jusqu'à la fabrication finale via les fichiers de commande G-code. Nous mettrons en évidence les étapes clés de leur utilisation, notamment la programmation, la mise en place des outils, le positionnement des pièces brutes, et l'exécution du cycle d'usinage. Enfin, nous proposerons une classification organisée des différentes machines CNC en fonction de leurs caractéristiques techniques, du nombre d'axes, et de leurs usages spécifiques — allant des tours CNC aux centres d'usinage polyvalents en passant par les fraiseuses, les machines de découpe laser ou les traceurs électriques. Ce chapitre permettra ainsi de mieux comprendre l'importance stratégique des machines CNC dans l'industrie actuelle, ainsi que leur fonctionnement fondamental dans la chaîne de production moderne.

I.2. Historique de commande numérique

La fabrication de précision moderne exige une extrême précision dimensionnelle et la finition de surface. Une telle performance est très difficile à réaliser manuellement, voire impossible, même avec des opérateurs experts. Dans les cas où il est possible, il faut du temps beaucoup plus élevé en raison de la nécessité pour la mesure dimensionnelle fréquente pour prévenir la surexploitation. Il est donc évident que le contrôle de mouvement automatisé remplacerait le manuel de contrôle dans la fabrication moderne.

Le développement de commande numérique par ordinateur (CNC) a également rendu possible l'automatisation des processus d'usinage avec souplesse pour gérer la production de petites et moyennes séries de pièces.

C'était en 1947, lorsque la commande numérique est née. Tout a commencé lorsque John C. Parsons de la Parsons Corporation, Traverse City, Michigan, un fabricant de pales de rotor d'hélicoptère, ne pouvait pas faire ses modèles assez vite. Donc, il a inventé une façon de coupler l'équipement informatique avec une pyrale du

gabarit. M. Parsons a utilisé les cartes pour faire fonctionner son système de Ron chiffres de poing.

1949 a été l'année d'un autre «besoin urgent». Le commandement américain Air Matériel s'est rendu compte que ses pièces pour avions et missiles ont été de plus en plus complexe. En outre, comme les dessins ont été constamment améliorés, les changements dans le dessin ont souvent été faites. Ainsi, dans leur recherche de méthodes de production plus rapide, un contrat d'étude de la Force aérienne a été attribué à la Parsons Corporation. Le laboratoire des mécanismes d'asservissement de l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT) était le sous-traitant.

En 1951, le MIT a repris le travail complet, et en 1952, le prototype de la machine NC d'aujourd'hui, une machine Cincinnati HydrotelMilling modifiée, a été démontrée avec succès. La commande numérique terme a été l'origine au MIT.

Initialement, la technologie CNC a été appliqué sur les tours, fraiseuses, etc. qui pourrait effectuer un seul type d'opération de découpe de métal. Plus tard, on a tenté de traiter une variété de pièces qui peuvent nécessiter plusieurs types différentes opérations d'usinage et de les terminer en une seule mise en place. Ainsi centres d'usinage CNC capables d'exécuter plusieurs opérations ont été développés. Pour commencer, centres d'usinage CNC ont été développés pour les composants prismatiques usinage combinant des opérations comme fraisage, perçage, alésage et taraudage. Peu à peu, les machines pour la fabrication de composants cylindriques, appelés centres de tournage ont été développés.[1]

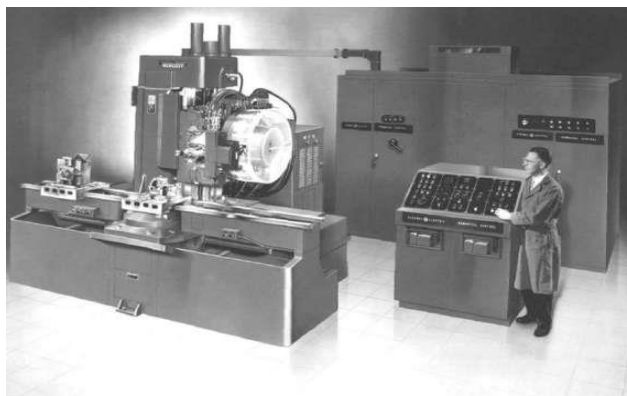


Figure I.1: permet les premières machines CNC en 1949 [1]

I.3. Définition de la commande numérique :

Apparue il y a seulement quelques dizaines d'année, la commande numérique CN impose actuellement sa technologie dans le monde de l'usinage. conçue pour piloter le fonctionnement d'une machine a partir des instructions d'un programme sans intervention direct de l'opérateur pendant son exécution, elle a dans un premier temps , permis de franchir un pas important dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles comme les fraiseuses, perceuses, aléseuses...etc. et elles sont ainsi

devenue capable d'assurer en qualité et en quantité une production à peine imaginable quelques années auparavant.

Aujourd'hui, de plus en plus étroitement associé aux progrès de la microélectronique et de l'informatique, la CN voit ses performances augmenter régulièrement tandis que, son prix et son encombrement ne cessent de diminuer.

Elle pénètre, de ce fait 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 actuelles sont capables d'effectuer des mouvements en combinant simultanément les positions sur les axes X, Y et Z.

Elles s'appellent commande numérique par ordinateur. De plus, elles sont capables de gérer plusieurs axes simultanément. On parle alors d'interpolation.

I.4. Définition du machine CNC:

Une machine CNC (Commande Numérique par Ordinateur) est un équipement entièrement ou partiellement automatisé qui reçoit des instructions sous forme de codes programmables, généralement écrits dans un langage spécifique tel que le G-code. Ces instructions sont stockées sur un support physique comme une disquette, une clé USB ou directement sur la mémoire interne de la machine. Lorsqu'une machine-outil est dotée d'un système de commande numérique capable non seulement de recevoir des ordres mais aussi de calculer les coordonnées précises des points définissant une trajectoire complexe — grâce à une fonction appelée interpolation, elle est alors qualifiée de CNC à ordinateur. Ce niveau d'intelligence embarquée lui permet de contrôler avec une grande précision les mouvements des outils selon plusieurs axes simultanément.

Le rôle principal d'une machine CNC est de traduire les données numériques reçues en mouvements physiques précis. Elle traite pour cela des informations relatives au positionnement, à la vitesse, à l'accélération et même à l'orientation de l'outil, afin de produire des pièces conformes aux spécifications techniques attendues. Grâce à son unité centrale de traitement, la machine génère des consignes numériques en temps réel, assurant ainsi un suivi de trajectoire optimal. Dotée d'une puissance de calcul élevée, la commande CNC offre une flexibilité d'utilisation bien supérieure à celle d'un automate programmable (API), ce dernier intervenant généralement en complément pour gérer les fonctions logiques et les entrées/sorties discrètes, telles que les capteurs, les boutons poussoirs ou encore les interrupteurs de sécurité, y compris les boutons d'arrêt d'urgence.

En résumé, la commande CNC constitue le cœur intelligent de la machine, permettant la transformation d'un programme numérique en mouvements mécaniques hautement précis. Elle représente ainsi un maillon essentiel dans l'automatisation industrielle moderne, garantissant qualité, productivité et répétabilité dans la

fabrication de pièces complexes. [3]

I.5. Domaine d'application des machine CNC :

Les machines CNC sont adaptées à la production de petites et moyennes séries répétitives. Elles offrent la possibilité d'usiner des pièces complexes sans nécessiter de démontage, même lorsque de nombreuses opérations sont requises.

Elles occupent une position intermédiaire entre les machines conventionnelles, très flexibles et destinées aux fabrications unitaires (prototypes, maintenance), et les machines de transfert, optimisées pour la production en grande série.[5]

Alors Les machines CNC sont utilisées dans divers secteurs industriels, notamment :

- L'aéronautique (pièces complexes en alliages légers)
- L'automobile (fabrication de composants moteurs)
- La mécanique de précision
- L'électronique et la robotique

I.6. Principe de fonctionnement des machines CNC:

Les machines à commande numérique (CNC) fonctionnent en suivant des instructions programmées qui contrôlent leurs mouvements et opérations d'usinage. Voici les étapes clés de leur fonctionnement.[6] :

I.6.1. Création du programme CNC:

Le processus commence par la génération d'un programme informatique, généralement en langage **G-code**. Ce code contient des instructions précises pour guider les mouvements de la machine.

- **Conception de la pièce** : Un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est utilisé pour modéliser la pièce.
- **Génération du parcours d'outils** : Un logiciel de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) traduit la conception en instructions compréhensibles par la machine.

I.6.2. Chargement et exécution du programme :

Une fois le programme créé :

- Il est transféré à l'unité de commande de la machine.
- L'opérateur règle la machine (choix des outils, fixation de la pièce).
- La machine interprète les instructions et démarre l'usinage.

I.6.3. Déplacements et usinage automatique :

La machine CNC se déplace selon trois ou plus d'axes (X, Y, Z) et parfois autour de plusieurs axes de rotation (A, B, C) pour exécuter les opérations d'usinage (fraisage, tournage, perçage, etc.).

- **Système d'entraînement** : Des moteurs électriques contrôlent les axes avec précision.

- Capteurs et boucles de rétroaction : Ils assurent un positionnement précis et corrigent d'éventuelles erreurs.

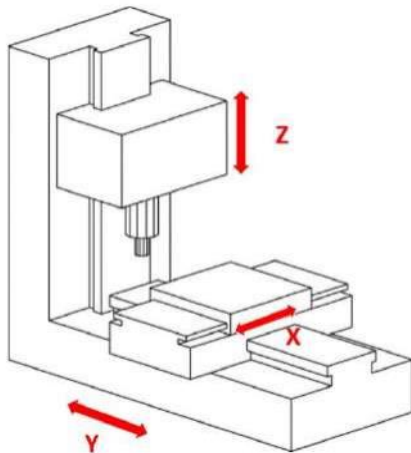


Figure I.2: Usinage 3 axes [4]

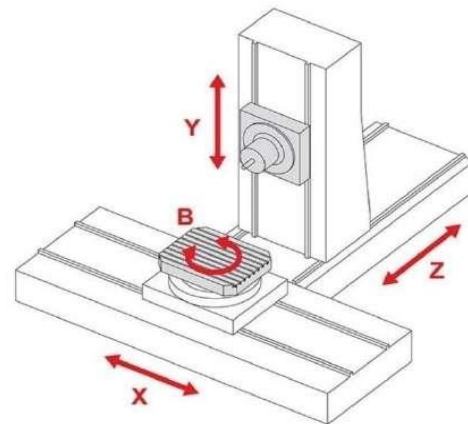


Figure I.3: Usinage 4 axes [4]

I.7 Classification des machines CNC:

La classification des machines CNC (Computer Numerical Control) peut se faire selon divers critères, tels que leurs fonctions, le type de mouvement, le nombre d'axes, la méthode de contrôle et le mode d'alimentation. Voici un aperçu détaillé [5] :

I.7.1 Classification selon les fonctions :

Les machines CNC sont catégorisées en fonction du type de pièces usinées ou des opérations réalisées :

- **Fraiseuses CNC** : Servent à façonner des formes, des rainures, des poches et des surfaces complexes à l'aide d'outils de coupe rotatifs.
- **Tours CNC** : Destinés à l'usinage de pièces cylindriques en les faisant tourner rapidement tout en les façonnant avec un outil de coupe.
- **Perceuses CNC** : Conçues pour percer des trous avec précision et capables d'effectuer des opérations telles que le taraudage et l'alésage.
- **Découpeuses plasma CNC** : Utilisent un jet de plasma à haute température pour découper des matériaux conducteurs.
- **Rectifieuses CNC** : Fonctionnent avec une meule rotative pour abraser ou façonner différents matériaux.[5]

I.7.2 Classification selon le type de mouvement

- **Systèmes point à point** : L'outil se déplace d'un point à un autre sans suivre une trajectoire continue (ex. : machines de perçage).
- **Systèmes à contournage** : L'outil suit une trajectoire continue pour découper ou usiner une pièce (ex. : fraiseuses et tours)[5].

I.7.3 Classification selon le nombre d'axes

Le nombre d'axes influence la complexité des mouvements réalisables :

- **2 axes** : Déplacement sur les axes X et Y (ex. : tours simples).
- **3 axes** : Ajout d'un axe Z permettant des mouvements en profondeur.
- **4 axes** : Intégration d'une rotation autour d'un axe (A).
- **5 axes** : Capacité de rotation autour de deux axes supplémentaires (A et C), adaptée aux pièces complexes.
- **Machines avancées (6 à 12 axes)** : Employées dans des secteurs tels que l'aérospatiale et la médecine pour des applications de haute précision.

I.7.4 Classification selon la méthode de contrôle

- **Systèmes à boucle ouverte** : Fonctionnent sans retour d'information sur la position réelle.
- **Systèmes à boucle fermée** : Intègrent des capteurs permettant d'ajuster les mouvements en temps réel.

I.7.5 Classification selon l'alimentation :

Les machines CNC peuvent être alimentées de différentes manières :

- **Électrique**
- **Hydraulique**
- **Pneumatique**

Ces classifications aident les fabricants à sélectionner la machine la plus adaptée à leurs exigences en matière de précision, de complexité et de volume de production.

1) Alimentation Électrique :

Les machines sont alimentées par un moteur électrique.

Exemples :

- Un centre d'usinage CNC utilisé pour fabriquer des pièces métalliques de précision.
- Une machine de découpe laser CNC qui utilise un moteur électrique pour contrôler la tête de découpe.
- Une imprimante 3D CNC utilisant des servomoteurs électriques pour déplacer les axes.

2) Alimentation Hydraulique :

Utilise un fluide sous pression pour déplacer les éléments mécaniques.

Exemples :

- Une presse plieuse CNC hydraulique utilisée pour plier des tôles épaisses.
- Une machine d'emboutissage hydraulique CNC pour former des pièces complexes en métal.
- Un tour CNC hydraulique capable de manipuler des pièces de grande taille avec force.

3) Alimentation Pneumatique :

Fonctionne à l'air comprimé, adaptée aux systèmes plus légers ou répétitifs.

Exemples :

- Un robot pick and place CNC pneumatique utilisé dans l'assemblage électronique.
- Une graveuse CNC pneumatique légère pour les matériaux tendres comme le plastique.
- Une machine de perçage CNC pneumatique dans les lignes de production automatisées.

Chapitre II :

La commande de la machine CNC.

II.1. Introduction :

Les avancées majeures en matière de technologie informatique et électronique ont profondément transformé le domaine des machines-outils à commande numérique (CNC), rendant leur fabrication plus accessible et moins coûteuse. En effet, la disponibilité sur le marché de composants électroniques abordables, tels que les microcontrôleurs Arduino, les drivers de moteurs pas à pas ou les cartes de commande CNC dédiées, a permis à un plus grand nombre d'acteurs — y compris les hobbyistes, les makers et les petites structures industrielles — de concevoir et de réaliser leurs propres machines CNC. Ces technologies ont non seulement réduit les coûts matériels, mais aussi considérablement raccourci les délais de prototypage et de développement, facilitant ainsi l'expérimentation, l'innovation et l'itération rapide.

L'utilisation d'un logiciel de contrôle comme Mach3 s'inscrit dans cette dynamique d'accessibilité et de simplification. Ce système de commande largement répandu permet de piloter facilement une machine CNC à trois axes (X, Y et Z), ce qui en fait un choix privilégié pour les projets de conception de prototypes simples ou intermédiaires. Mach3 offre une interface conviviale, une grande compatibilité avec différents types de matériels, ainsi qu'une capacité d'intégration avec des outils de génération de G-code issus de logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur). Cela facilite l'ensemble du processus, de la programmation jusqu'à l'exécution physique des opérations d'usinage.

Le développement d'un tel prototype se structure naturellement en trois grandes parties, chacune essentielle au bon fonctionnement de la machine :

- La partie électronique, qui comprend la sélection et l'assemblage des composants électriques (microcontrôleur, drivers de moteurs, alimentation, câblage, etc.) et assure la communication entre le logiciel de commande et les actionneurs.
- La partie mécanique, qui concerne la conception et la réalisation du bâti, des systèmes de guidage (glissières, vis à billes, coulisseaux), ainsi que du système d'entraînement (moteurs pas à pas ou servomoteurs), garantissant précision et rigidité.
- La partie logicielle et programmation, qui implique la configuration du logiciel de pilotage (Mach3 dans notre cas), la génération du code-machine (G-code) à partir de modèles CAO/FAO, ainsi que l'implémentation éventuelle de scripts ou de fonctions personnalisées pour automatiser certaines tâches.

En combinant ces trois aspects, la réalisation d'un prototype CNC à 3 axes devient un projet réalisable, pédagogique et pertinent pour explorer les fondamentaux du contrôle numérique, tout en préparant aux applications industrielles plus complexes.

[7]

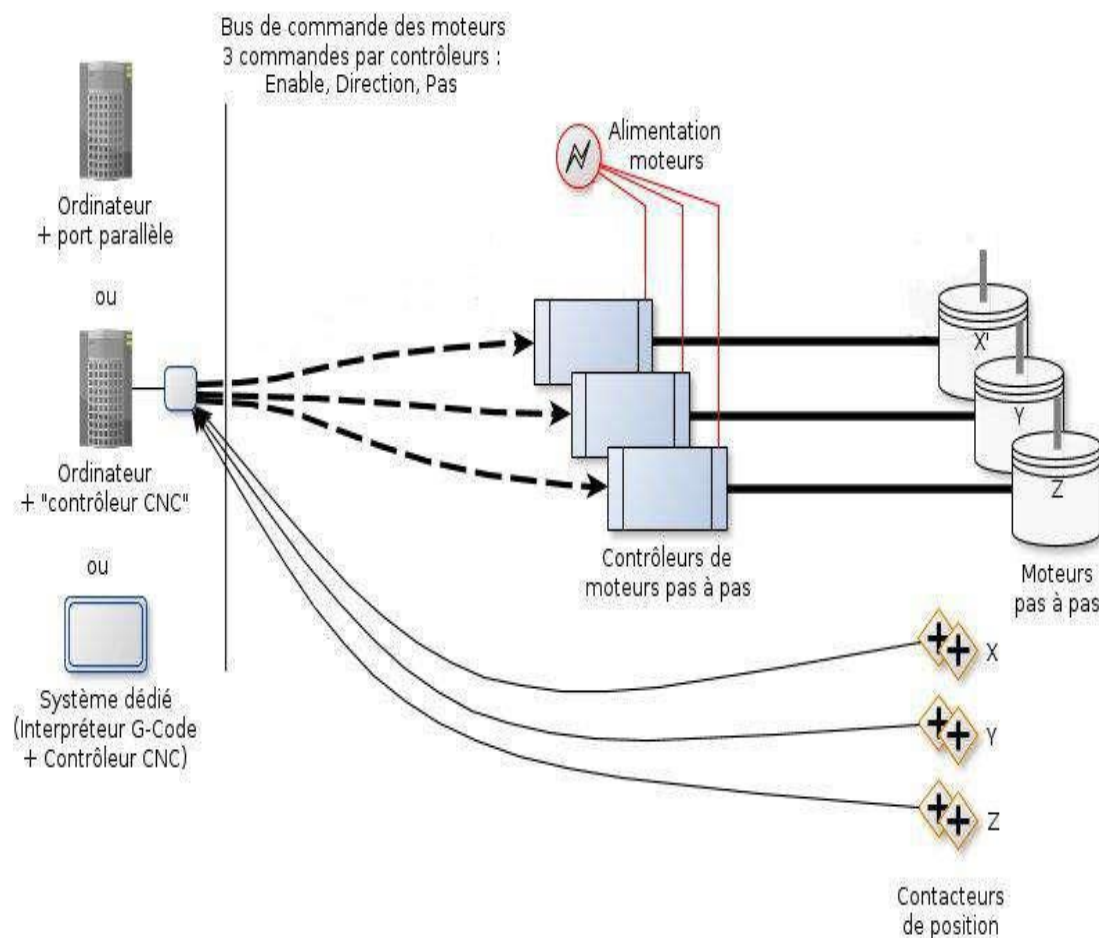


Figure II.1: Schéma de la structure de commande [7]

II.2. Moteur pas à pas :

II.2.1. Introduction :

De nombreuses applications de la commande numérique ont remis en faveur le moteurs pas à pas, appelé aussi moteur à impulsions qui était utilisé depuis déjà longtemps. Les moteurs pas à pas ont été créés en 1930. Leurs développements ont commencé au début des années soixante grâce à l'apparition des microprocesseurs, microcontrôleurs et aux énormes progrès de l'électronique de puissances à transistor.

Et encore, pendant des années, l'apparition essentielle fût celle de la commande numérique des machines outil ayant besoin d'un tel type de moteur. Puis avec le développement de la recherche spatiale, de nouveaux moteurs pas à pas firent leur apparition (dimensions réduites et pas angulaires plus grand) et furent largement utilisés grâce à leurs avantages important de fiabilité et de simplicité de commande qu'ils offraient sur les autres moteurs.[8]

II.2.2.2. Types et principe de fonctionnement des moteurs pas à pas :

Le fonctionnement d'un moteur pas à pas repose sur plusieurs éléments essentiels :

- Une unité de commande, telle qu'un microprocesseur, qui génère des impulsions dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du moteur. Elle joue également un rôle dans la gestion du sens de rotation.
- Un séquenceur qui aiguillera les impulsions sur les différentes bobines du moteur.
- Une alimentation de puissance[8]

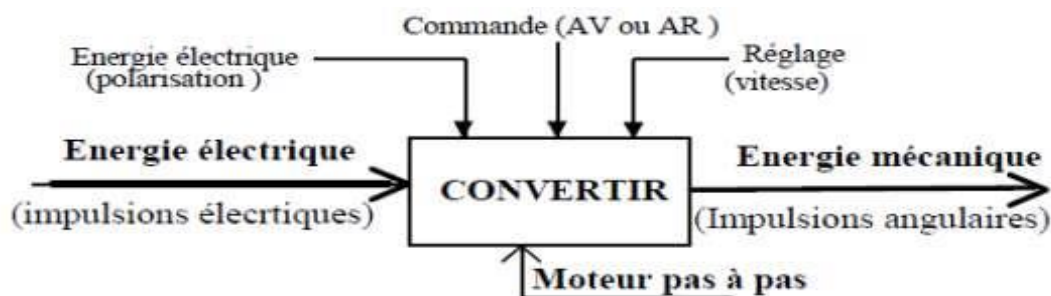


Figure II.2: Plan de la conversion d'un Moteur pas à pas [8]

II.2.2.2.1. Moteur pas à pas à réluctance variable :

II.2.2.2.1.1. Constitution:

Ce moteur comporte :

- Un Rotor de forme cylindrique en fer doux dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor).
- Une denture dont le pas n'est pas le même au stator et au rotor.
- Le rotor n'est pas aimanté.
- Un Stator constitué d'empilage de tôles découpées, encochées.
- Les enroulements en série sont diamétralement opposés afin que les attractions simultanées s'engendrent pas une usure prématurée des paliers du rotor.

II.2.2.2.1.2. Fonctionnement:

- Quand on alimente les bobines AA', puis BB' et enfin CC', le rotor se place de telle façon que le flux qui le traverse soit maximal ; la réluctance est donc minimale.
- On constate que les pôles les plus proches des bobines alimentées se positionnent en face de ces dernières.
- Pour rendre la réluctance variable, le rotor et le stator auront des encoches disposées de telle façon qu'il n'existe qu'une seule possibilité pour diminuer la réluctance compte-tenu de la bobine alimentée.[8]

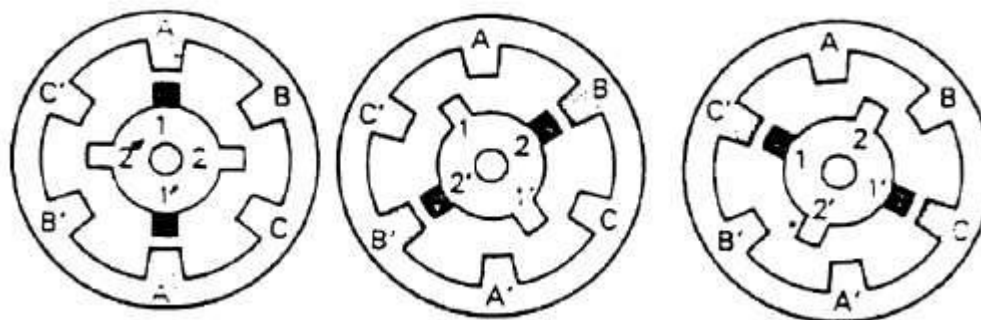


Figure II.3: Fonctionnement d'un Moteur pas à pas (MPAP)[8]

$$N_p = 360/ar-as = m.p. K1. K2$$

Ar : Pas dentaire rotorique (en degrés).

As : Pas dentaire statorique (en degrés).

M : Nombre de phases au stator

P : Nombre de paires de pôles au rotor

K1 : Type d'alimentation.

K2 : Type de commande.

II.2.2.2.2. Moteur pas à pas hybride :

II.2.2.2.2.1. Constitution :

Le moteur pas à pas hybride, également appelé moteur à réluctance polarisée, constitue une solution intermédiaire entre les deux grandes familles des moteurs pas à pas : ceux à aimant permanent et ceux à réluctance variable. Cette combinaison ingénieuse lui permet d'allier les avantages des deux technologies, offrant ainsi un bon compromis entre le couple élevé, la précision du positionnement et la finesse du pas.

Sa structure particulière repose sur un rotor composite, constitué de deux disques en matériau ferromagnétique, parfaitement dentés et montés sur le même arbre avec un décalage angulaire précis — généralement égal à la moitié du pas angulaire des dents. Entre ces deux disques est inséré un aimant permanent axial, qui joue le rôle de source de polarisation magnétique. Ce dernier génère un champ magnétique constant dans l'entrefer, ce qui permet au moteur de produire un couple plus important que celui des moteurs à réluctance variable classique.

Le stator, quant à lui, est constitué de plusieurs pôles inducteurs entourés d'enroulements, disposés de manière à créer des champs magnétiques variables lors de l'excitation électrique successive des bobines. Lorsque ces enroulements sont alimentés selon une séquence bien définie, le rotor se déplace par pas angulaires discrets, en s'alignant successivement avec les pôles statoriques activés sous l'effet combiné du champ de l'aimant et du courant appliqué.

Grâce à cette architecture unique, le moteur pas à pas hybride combine une grande précision angulaire, un couple statique et dynamique élevé, ainsi qu'une meilleure stabilité magnétique. Il est donc largement utilisé dans des applications exigeant un positionnement très précis, telles que les imprimantes 3D, les machines-

outils CNC, les systèmes robotiques ou encore les dispositifs médicaux.

En somme, la constitution spécifique du moteur pas à pas hybride en fait un choix privilégié dans de nombreuses solutions industrielles où fiabilité, performance et contrôle fin du mouvement sont des exigences critiques.[8]

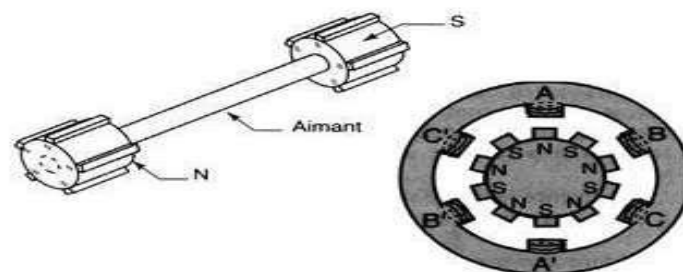


Figure II.4: Constitution d'un MPAP hybride [8]

II.2.2.2.2. Fonctionnement :

Le moteur à réluctance polarisée exploite à la fois les principes des moteurs à aimants permanents et à réluctance variable afin d'optimiser son couple moteur. Sa conception repose sur une différence entre le nombre de dents du rotor et celui du stator, ce qui permet une meilleure synchronisation du champ magnétique.

Lorsqu'une paire de bobines est alimentée, le rotor s'oriente naturellement de manière à maximiser le flux magnétique en alignant ses dents nord et sud. Ce mécanisme améliore l'efficacité du moteur en optimisant le transfert d'énergie électromagnétique, ce qui le rend idéal pour diverses applications nécessitant une haute performance.[8]

II.2.2.2.3. Moteur à aimant permanent :

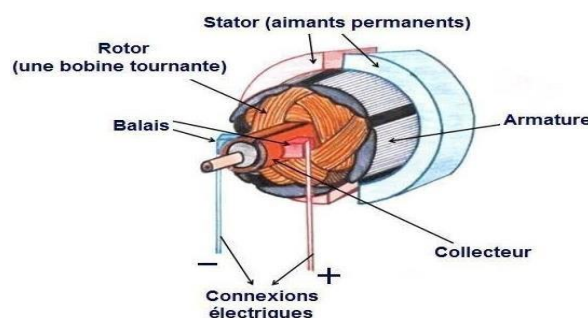


Figure II.5: Moteur à aimant permanent [8]

II.2.2.2.3.1. Constitution :

Le moteur à aimant permanent (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) est un type de moteur électrique largement utilisé dans divers domaines

industriels, domestiques et technologiques en raison de sa simplicité, de son efficacité énergétique et de sa fiabilité. Il se distingue principalement par la présence d'aimants permanents sur son rotor, ce qui lui confère des caractéristiques dynamiques et électromagnétiques avantageuses.

Au niveau du stator, il est constitué d'un ensemble de bobines disposées autour d'un circuit magnétique généralement réalisé en tôles ferromagnétiques feuilletées. Ces bobines, lorsqu'elles sont alimentées par un courant alternatif ou en impulsions contrôlées selon le mode de pilotage, génèrent un champ magnétique variable. La polarité de chaque pôle statorique dépend directement du sens du courant qui traverse la bobine correspondante. En fonction de la configuration d'alimentation (mono-phase, biphasée ou triphasée), le stator produit un champ tournant ou séquentiel capable de provoquer une rotation progressive ou continue du rotor.

Concernant le rotor, il est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, généralement en matériaux comme le néodyme, le samarium-cobalt ou les ferrites, selon l'exigence en couple et en température de fonctionnement. Contrairement aux moteurs classiques à induction, le rotor ne comporte aucune bobine ni aucun circuit électrique actif, ce qui réduit les pertes par effet Joule et améliore le rendement global. Lorsque le champ magnétique généré par le stator varie, les pôles magnétiques du rotor s'alignent avec ceux du stator, entraînant ainsi une rotation continue ou incrémentale, selon le mode de commande appliqué.

Ce principe de fonctionnement permet au moteur à aimant permanent de garantir une rotation fluide, précise et relativement silencieuse, tout en assurant un couple élevé même à faible vitesse, sans nécessiter de système de ventilation excessif. De plus, grâce à l'absence de glissement entre les parties mobiles (comme c'est le cas dans les moteurs asynchrones), ces moteurs offrent une meilleure réponse dynamique et une synchronisation exacte entre la fréquence d'alimentation et la vitesse de rotation.

Grâce à ces atouts, le moteur à aimant permanent est très utilisé dans des applications telles que les actionneurs robotiques, les véhicules électriques, les appareils ménagers à vitesse variable (comme les lave-linge ou les pompes), ainsi que dans les systèmes de positionnement précis utilisés dans l'automatisation industrielle et les équipements médicaux. [8]

II.2.2.3. Modes de commande des moteurs pas à pas :

II.2.2.3.1. Mode méthode d'entraînement par onde (Wave Drive ou One-phase-on) :

Dans ce mode, une seule bobine est activée à la fois, ce qui permet d'économiser de l'énergie mais réduit le couple produit par le moteur.

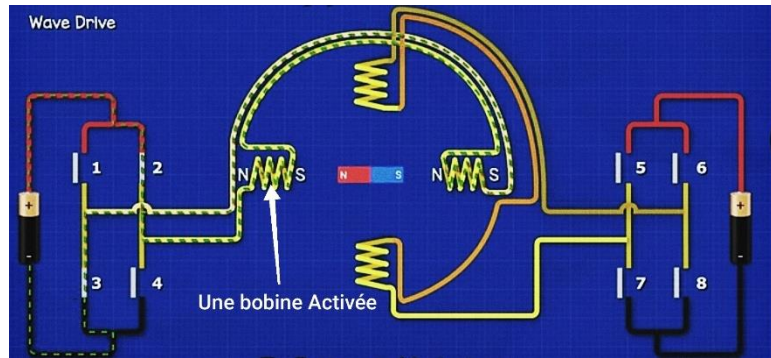


Figure II.6: Principe de fonctionnement du moteur pas à pas en mode d'entraînement par onde. [9]

Avantages :

- Réduction de la consommation d'énergie.
- Simplicité de commande.

Inconvénients :

- Couple plus faible que les autres modes.
- Moins stable et moins utilisé dans les applications exigeantes.
- Perte de précision par rapport aux autres modes de commande.

II.2.2.3.2. Mode plein Pas (Full Step)

Le mode plein pas est une méthode de commande dans laquelle le moteur avance par incréments fixes à chaque impulsion électrique. Deux bobines sont activées simultanément, permettant ainsi d'obtenir un couple maximal. Ce mode est le plus simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'électronique complexe.

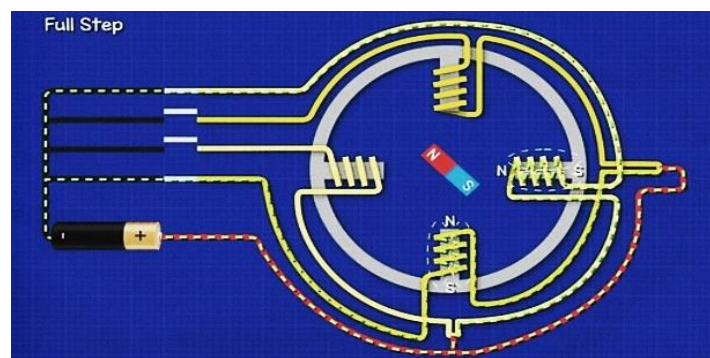


Figure II.7: Principe de fonctionnement du moteur Pas à pas en mode Plein pas.[9]

Avantages :

- Fournit un couple maximal.
- Facile à mettre en œuvre avec un simple driver.
- Convient aux applications où la précision extrême n'est pas requise.

Inconvénients :

- Mouvement saccadé et moins fluide.
- Résolution limitée, ce qui peut être insuffisant pour les applications de haute précision.

II.2.2.3.3. Mode Demi-Pas (Half Step) :

Le mode demi-pas consiste à alterner entre l'activation d'une seule bobine et l'activation de deux bobines à la fois. Cela permet d'insérer des positions intermédiaires entre les pas complets, doublant ainsi la résolution du moteur.

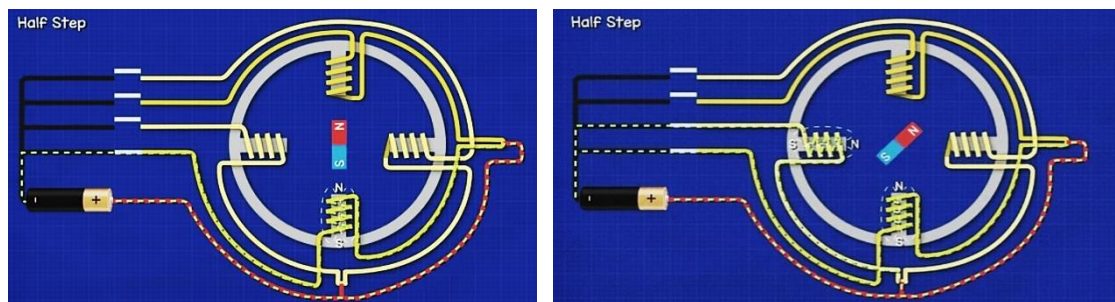


Figure II.8: Principe de fonctionnement du moteur
Pas à pas en mode Demi-Pas.[9]

Avantages :

- Résolution deux fois plus élevée qu'en mode plein pas.
- Mouvement plus fluide et réduction des vibrations.
- Amélioration de la précision sans nécessiter une électronique trop complexe.

Inconvénients :

- Légère variation du couple entre les étapes (moins constant que le mode plein pas).
- Peut toujours générer des vibrations, bien que réduites par rapport au mode plein pas.

II.2.2.3.4. Mode Micro-Pas (Microstepping)

Le mode micro-pas consiste à alimenter les bobines avec des signaux électriques progressifs, souvent sous forme sinusoïdale, pour diviser chaque pas en plusieurs micro-incréments. Cela permet un contrôle plus fin du moteur et un mouvement extrêmement fluide.

Avantages :

- Résolution beaucoup plus élevée, pouvant atteindre plusieurs milliers de positions par tour.
- Réduction significative du bruit et des vibrations.
- Mouvement plus doux, idéal pour les applications nécessitant une grande précision (CNC, impression 3D, robotique).

Inconvénients :

- Réduction du couple à faible vitesse.
- Nécessite un driver plus complexe et performant.
- Plus difficile à mettre en œuvre correctement sans une bonne gestion du courant.

II.2.2.4. Taille et Puissance des Moteurs Pas à Pas :

Les moteurs pas à pas sont classés non seulement en fonction de leur angle de pas, mais aussi selon la taille de leur cadre, qui correspond au diamètre de leur boîtier. Par exemple, un moteur de taille 11 possède un diamètre d'environ 1,1 pouce, tandis qu'un moteur de taille 23 a un diamètre de 2,3 pouces (58 mm). Toutefois, la longueur du boîtier peut varier d'un moteur à l'autre, même au sein d'une même catégorie de cadre.

En général, pour une taille de cadre donnée, une plus grande longueur de boîtier entraîne une augmentation du couple disponible.

Les moteurs pas à pas pilotés par circuits intégrés fonctionnent avec des niveaux de puissance allant de moins d'un watt pour les plus petits modèles jusqu'à 10 à 20 watts pour les plus grands. Cependant, les fabricants précisent rarement la dissipation thermique maximale ou les limites de puissance du moteur. Pour estimer cette dissipation, on applique la formule $P = V \times I$.

Par exemple, un moteur pas à pas de taille 23 peut être spécifié pour fonctionner sous 6 V et 1 A par phase. Lorsque les deux phases sont activées simultanément, la dissipation de puissance atteint 12 watts.

La puissance dissipée est généralement déterminée en fonction de la température du boîtier du moteur, qui est évaluée à 65 °C au-dessus de la température ambiante en air immobile. Si le moteur est fixé à un dissipateur thermique, la dissipation de puissance admissible peut être augmentée. Cela est crucial pour optimiser le rapport taille/puissance de sortie/coût, car un moteur est conçu pour fonctionner à sa dissipation de puissance maximale afin d'être le plus efficace possible. [10]

II.2.2.5. Principes communs aux moteurs pas à pas :

Les différents types de moteurs pas à pas partagent plusieurs caractéristiques communes . En voici quelques-unes :

II.2.2.5.1. Caractéristiques dynamiques

Les moteurs pas à pas ne sont pas conçus pour des vitesses élevées. Même les modèles les plus performants dépassent rarement une vitesse maximale de 3000

tr/min. Cette relative « lenteur » présente un avantage : ces moteurs sont naturellement dépourvus de balais (la plupart des modèles de haute qualité étant en outre équipés de roulements à billes). Grâce à cette conception, ils offrent une durée de vie extrêmement longue sans nécessiter d'entretien.

II.2.2.5.2. Couple en fonction du courant

Le couple généré par un moteur pas à pas dépend du courant qui le traverse. La Fig. II.9 illustre la relation entre le couple et le courant pour un moteur typique. Par exemple, pour un courant de 8 A, le couple atteint 3 N·m. Il est important de noter que ce couple n'est pas constant, car il varie en fonction de la position du rotor. La courbe présentée dans la Fig. II.9 (selon l'exemple considérée par [12]) représente le couple maximal que le moteur peut exercer lors de la transition d'une position à une autre. Ce couple est appelé couple dynamique maximal ou pull-over torque. Lorsque le rotor s'arrête, un courant de maintien doit être appliqué à la dernière bobine alimentée afin de stabiliser sa position finale.

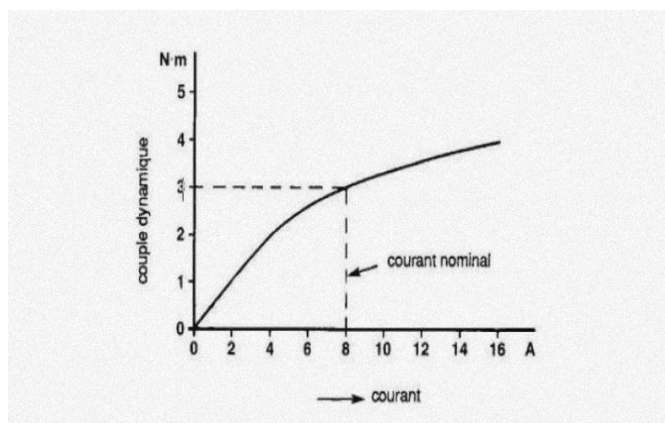


Figure II.9. Couple Dynamique en fonction du courant [12]

II.2.2.5.3. Influence de la Charge

L'impact de la charge est directement lié au calcul du couple moteur, qui dépend des paramètres d'inertie (exprimés en kg.m^2) et d'accélération (en m.s^{-2}). À caractéristiques identiques en termes d'accélération et de chaîne cinématique, le couple requis par un moteur pas à pas varie en fonction de la charge à entraîner. Ainsi, toute application utilisant un moteur pas à pas nécessite une collecte précise des données essentielles à son dimensionnement optimal [12] :

- La masse de la charge à déplacer (en kg),
- Son inertie (en kg.m^2),
- Le type de transmission mécanique (vis, courroie crantée, crémaillère, etc.),
- Le type de guidage permettant d'évaluer les frottements (secs et visqueux),
- Les efforts appliqués (en N),
- Le déplacement critique (distance parcourue en fonction du temps).

Dans un contexte industriel, le dimensionnement d'un moteur pas à pas doit être rigoureusement calculé ou volontairement surdimensionné pour éviter tout risque de glissement par « perte de pas ». Étant donné que ce type de moteur fonctionne en boucle ouverte (sans asservissement), il ne peut pas corriger sa position en cas de dérapage.

II.2.2.5.4. Caractéristiques du Couple en Fonction de la Vitesse :

Le couple du moteur (Fig. II.10) dépend de plusieurs facteurs :

- L'intensité traversant les bobines,
- Sa position angulaire à un instant donné lorsqu'il passe d'une bobine à l'autre,
- La vitesse de pilotage,
- Le mode de fonctionnement.

En mode biphasé, le champ créé dans les bobines est 1,4 fois plus grand qu'en mode monophasé, ce qui entraîne un couple résultant plus élevé.

Ces caractéristiques du couple en fonction de la vitesse sont essentielles pour sélectionner le moteur et la méthode d'entraînement appropriés à une application spécifique. Elles dépendent du moteur, du mode d'excitation et du type de pilote ou de méthode d'entraînement. Une courbe typique « vitesse – couple » est illustrée à la figure II.10.

Pour mieux comprendre cette courbe, il est utile de définir ses différentes parties :

- **Couple de Maintien** : Le couple maximal produit par le moteur à l'arrêt.
- **Courbe d'Engagement** : Cette courbe définit une zone appelée région de démarrage-arrêt. Elle représente la fréquence maximale à laquelle le moteur peut démarrer ou s'arrêter instantanément, sous charge, sans perte de synchronisme.
- **Fréquence de Démarrage Maximale** : La fréquence de pas maximale à laquelle le moteur peut démarrer sans charge appliquée.
- **Courbe de Décrochage** : Cette courbe définit une zone appelée région de poursuite. Elle représente la fréquence maximale à laquelle le moteur peut fonctionner sans perdre le synchronisme. Comme cette région est en dehors de la zone d'engagement, le moteur doit être accéléré ou décéléré progressivement pour y entrer.
- **Fréquence de Poursuite Maximale** : La fréquence de fonctionnement maximale du moteur lorsqu'aucune charge n'est appliquée.

Les caractéristiques d'engagement varient également en fonction de la charge. Plus l'inertie de la charge est grande, plus la zone d'engagement est réduite. On peut observer, à partir de la forme de la courbe, que la fréquence des pas influence la capacité du moteur pas à pas à produire du couple. La diminution du couple à mesure que la vitesse augmente est due au fait qu'à des vitesses élevées, l'inductance du moteur devient l'élément dominant du circuit.

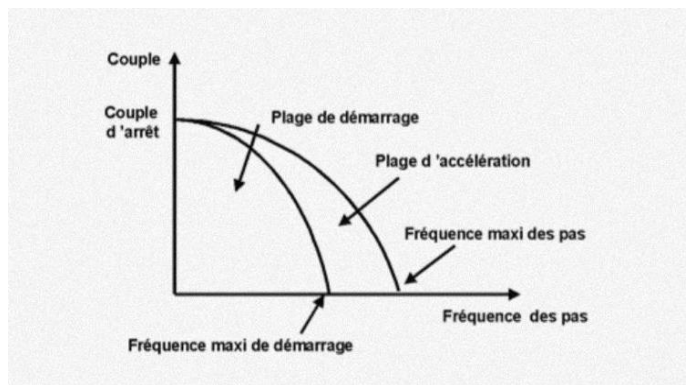


Figure II.10. Couple maximal en fonction de la fréquence des pas [11]

II.2.2.5.5. Avantages des moteurs pas à pas :

- **Précision et contrôle** : Ils permettent un positionnement angulaire précis sans besoin de capteur de retour (boucle ouverte).
- **Réversibilité** : Facile à contrôler dans les deux sens de rotation.
- **Bon couple à basse vitesse** : Idéal pour des applications nécessitant un couple élevé à faible vitesse.
- **Simplicité de commande** : Facile à piloter avec des signaux numériques, ce qui les rend compatibles avec les microcontrôleurs et les automates.
- **Fiabilité** : Moins de composants mécaniques sujets à l'usure (pas de balais ni de collecteur).

II.2.2.5.6. Inconvénients:

- **Perte de pas** : En cas de surcharge ou de variation brutale du couple, le rotor peut ne pas suivre la séquence des commandes.
- **Consommation d'énergie élevée** : Même à l'arrêt, le moteur doit rester alimenté pour maintenir sa position.
- **Moins efficace à haute vitesse** : La perte de couple augmente avec la vitesse, limitant son efficacité dans les applications rapides.
- **Vibrations et bruit** : Peut générer des oscillations et du bruit, notamment en mode plein pas.
- **Rendement inférieur aux moteurs synchrones classiques** : Moins efficace en termes de conversion d'énergie.

II.2.2.5.7. Applications Des moteur pas à pas :

- Les moteurs pas à pas sont largement utilisés dans les applications mécaniques nécessitant un contrôle simple de la position ou de la vitesse en boucle ouverte, notamment dans les systèmes de positionnement et d'indexation.
- On les retrouve, par exemple, en robotique pour le positionnement des axes et la variation de vitesse du robot, ainsi que dans les imprimantes classiques et 3D, les scanners, les photocopieurs et les platines vinyles de DJ.

- En informatique, ils servent au déplacement des têtes de lecture et d'impression, ainsi qu'à l'avance du papier dans les imprimantes.
- En astronomie, ils permettent de positionner les télescopes pour suivre les astres, et en réception TV par satellite, ils assurent l'orientation des paraboles.
- Ils sont également présents dans les pompes à perfusion, les pousse-seringues, ainsi que dans les systèmes de positionnement des machines industrielles et des machines-outils.

II.3. La carte Mach3

II.3.1. Introduction :

Le système de contrôle permet généralement de gérer le démarrage et l'arrêt de la rotation des moteurs (voire de réguler leur vitesse), d'activer ou de désactiver le liquide de refroidissement et de s'assurer qu'un programme ou un opérateur ne tente pas de déplacer un axe au-delà de ses limites.

Il comprend également des commandes accessibles via des boutons, un clavier, un potentiomètre, un générateur d'impulsions manuel (MPG) ou une manette, permettant à l'opérateur de piloter manuellement la machine et de démarrer ou d'arrêter un programme. Un écran est également présent pour fournir des informations en temps réel sur l'état de la machine.

Comme les commandes d'un programme G-code peuvent nécessiter des déplacements coordonnés complexes, le système de contrôle doit être capable d'exécuter de nombreux calculs en temps réel (par exemple, l'usinage d'une hélice exige des calculs trigonométriques avancés). Historiquement, cela faisait du système de contrôle un élément coûteux de l'équipement. [5]

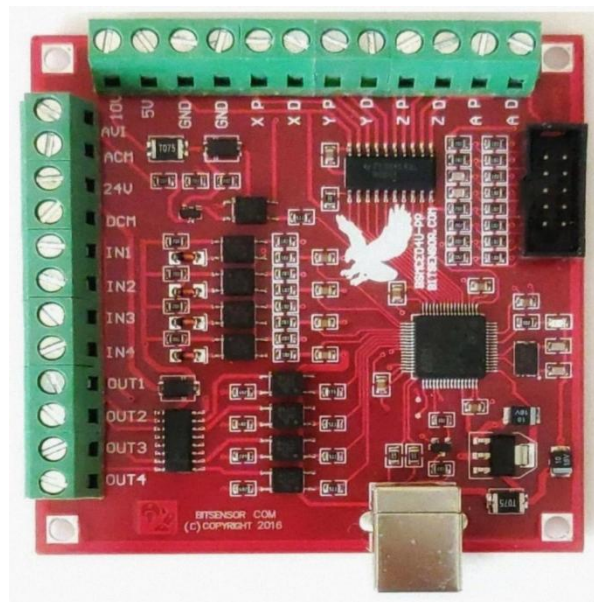


Figure II.11. la Carte de contrôle de mouvement
USB Mach3 BSMCEO4U V2.2 [5]

II.3.2. Fonctionnement de Mach3

Mach3 est un ensemble de logiciels permettant de transformer un ordinateur en un système de contrôle performant et économique, remplaçant ainsi l'élément (3) de la figure II.13.

Pour utiliser Mach3, il est recommandé d'avoir un ordinateur fonctionnant sous Windows XP ou Windows 2000, équipé d'un processeur d'au moins 1 GHz et d'un écran avec une résolution de 1024 x 768. Un ordinateur de bureau offrira généralement de meilleures performances qu'un ordinateur portable tout en étant plus abordable. Il est également possible d'utiliser cet ordinateur pour d'autres tâches dans l'atelier, comme exécuter un logiciel CAD/CAM (élément (1) de la figure II.13) lorsque la machine n'est pas en fonctionnement.

Mach3 communique principalement via un ou deux ports parallèles (ports d'imprimante) et peut également utiliser un port série (COM) en option. Les contrôleurs des moteurs d'axe doivent être compatibles avec les signaux PAS (pulse) et DIRECTION (dir), qui sont standard pour la plupart des moteurs pas à pas, qu'ils fonctionnent en courant continu ou alternatif. [5]

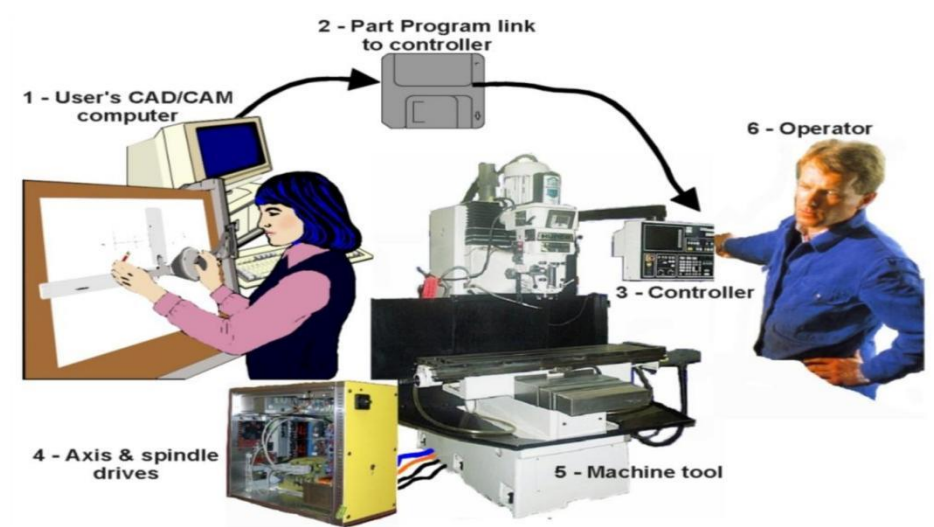


Figure II. 12 : Système de contrôle numérique .[5]

II.3.3. Logiciel de contrôle Mach3 :

II.3.3.1. Description :

Mach3, développé par ArtSoft USA, est proposé en deux versions : une version gratuite et une version commerciale. Bien qu'elles soient identiques en termes de fonctionnalités, la version gratuite est limitée à l'exécution de scripts ne dépassant pas 500 lignes, tandis que la version commerciale permet l'exécution de programmes pouvant atteindre plus de 10 000 000 de lignes.

Lors du lancement du logiciel Mach3, l'écran peut sembler surchargé en raison du grand nombre de boutons, d'afficheurs et d'autres éléments. Cependant, seules quelques configurations sont nécessaires pour faire fonctionner la machine.

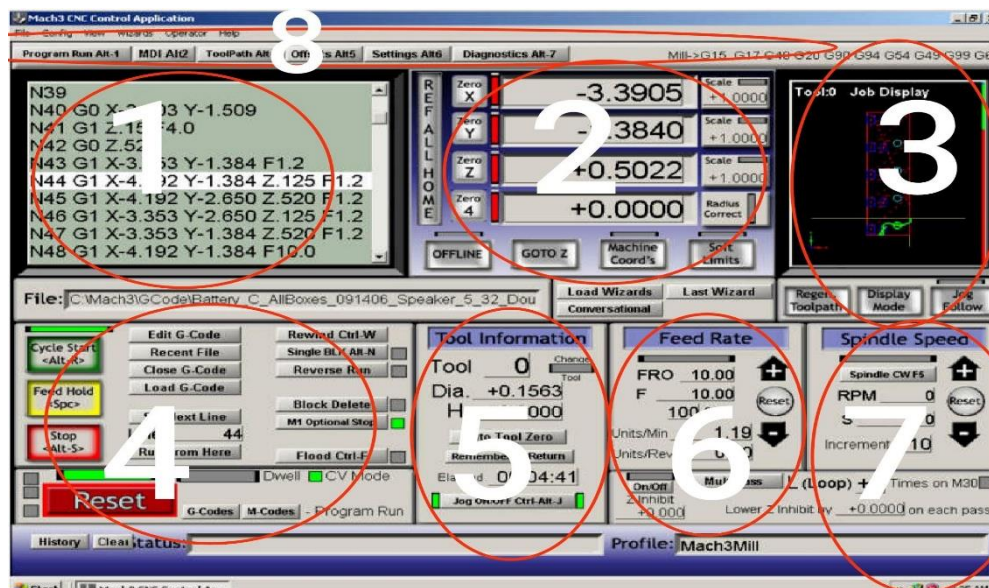


Figure II. 13 : interface de logiciel mach3 .

1. Fenêtre de G-code : affiche le G-code.
2. DRO (Digital Read Out) : indique la position actuelle de chaque axe, en affichant soit les coordonnées de la pièce, soit celles de la machine.
3. Affichage du chemin d'outil de coupe.
4. Fenêtre des procédures.
5. Informations sur l'outil.
6. Interface de flux.
7. Interface de contrôle de la vitesse de la broche.
8. Onglets Mach3.

II.3.4. Le rôle de Mach3 :

Mach3 est un logiciel hautement configurable et adaptable à tout type de machine CNC. Avant de l'utiliser, il est nécessaire de lui fournir toutes les caractéristiques de la machine afin qu'il puisse la piloter efficacement. Parmi les paramètres à configurer dans Mach3, on retrouve :

- Un bouton d'arrêt d'urgence (Estop), indispensable sur chaque machine.
- Le type de signal de commande à générer : STEP/DIR ou Quad A/B.
- Les limites de l'espace de travail.
- Le brochage des fins de course avec l'ordinateur.
- Les paramètres du contrôleur PID de l'outil.
- La vitesse maximale pour chaque axe.

II.3.5. Modes opératoires de Mach3

II.3.5.1. Mode manuel (Jogging)

Une fois Mach3 lancé, le mode manuel peut être activé en appuyant sur la touche TAB du clavier. Ce mode permet de contrôler manuellement la position de l'outil. La figure (II.15) illustre l'interface de commande manuelle de Mach3.



Figure II. 14 : MPG MODE.

II.3.5.2. Mode MDI :

Le mode MDI offre la possibilité de saisir manuellement le script G-code.

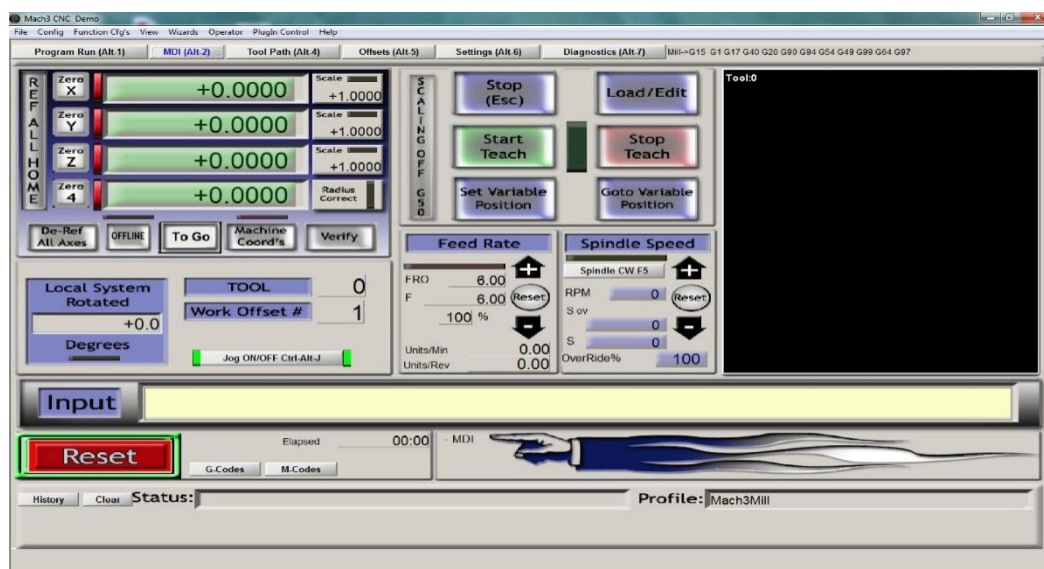


Figure II.15 : MDI INTERFAS

II.3.5.3. Mode automatique

Importons directement le fichier G-code contenant le programme à exécuter.

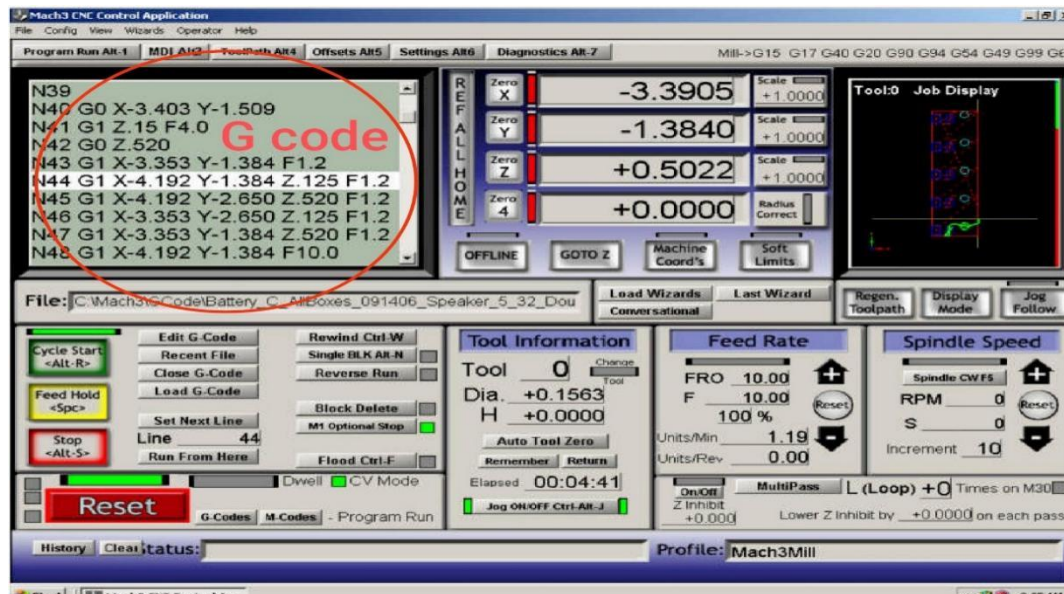


Figure II. 16 : Mode automatique

II.3.6. Configuration de Mach3

II.3.6.1. Configuration de l'unité

Sélectionner l'unité de mesure en millimètres (mm) via l'onglet Mach3 → Config → Select Native Units.

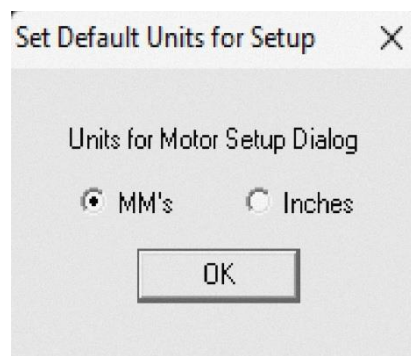


Figure II. 17 : Configuration unités

II.3.6.2. Configuration initiale

configuration des ports et des broches s'effectue comme suit : Config → Ports and Pins.

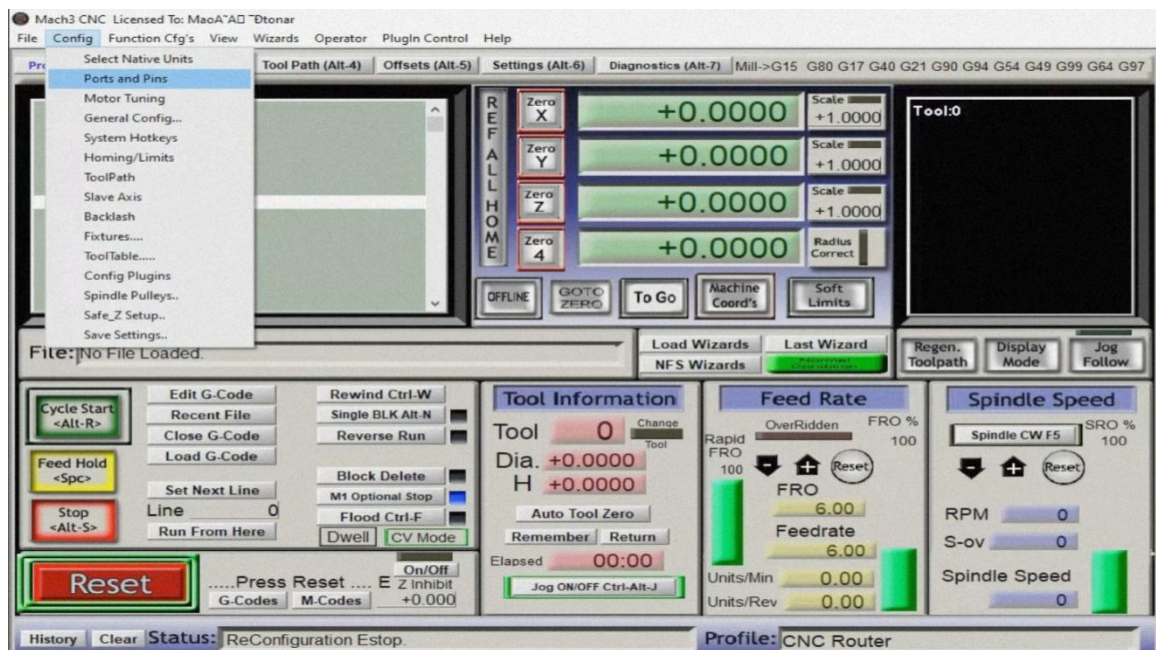


Figure II. 18 :configuration initial/

II.3.6.2.1. Définition des adresses du port

Pour configurer les ports et les axes, il faut accéder à l'option Port Setup and Axis Selection dans le menu Ports and Pins.

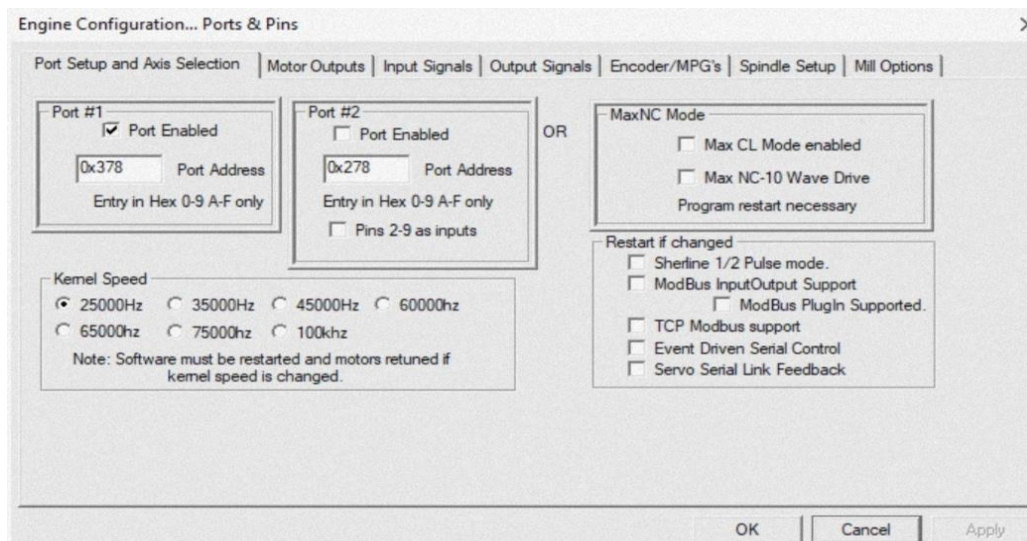


Figure II. 19 :configuration ports pins

Par défaut, l'adresse du Port 1 du PC est 0x378. Cependant, si des cartes d'extension PCI pour ports parallèles sont utilisées, il sera nécessaire de déterminer l'adresse spécifique attribuée à chaque port.

Choix de la fréquence du noyau

Dans le même onglet, il est possible de sélectionner une fréquence comprise entre 25 000 Hz et 100 000 Hz, en fonction des performances du processeur et des charges de travail pendant l'exécution de Mach3. En général, une fréquence de 25 000 Hz est suffisante.

II.3.6.2.2. Signaux de sortie des axes

Dans l'onglet Motors Outputs du menu Ports and Pins, il faut définir le brochage correspondant à la configuration de la machine.

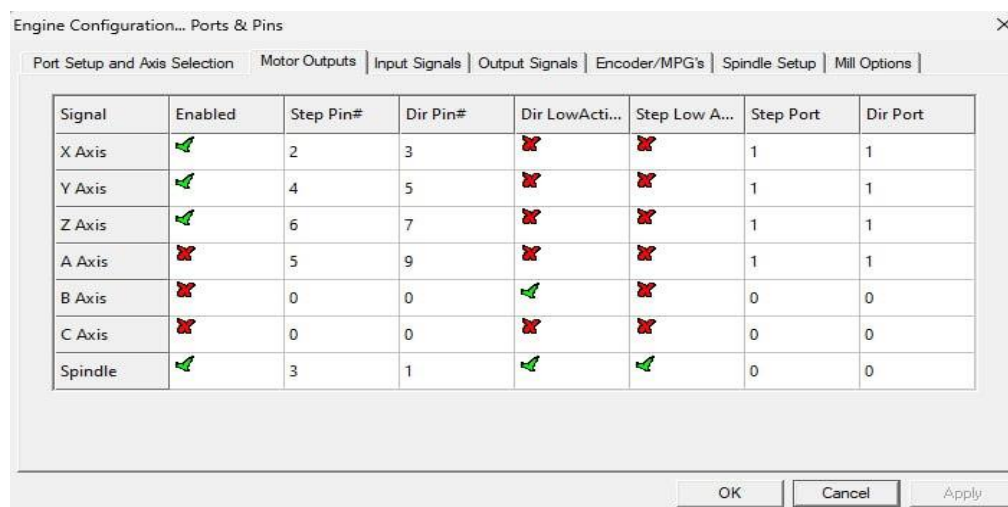


Figure II. 20 : Sorties Moteurs

II.3.6.2.3. Signaux d'entrée

De la même manière, nous accédons à l'onglet Input Signal pour configurer les signaux d'entrée et à l'onglet Output Signal pour configurer les signaux de sortie de notre machine, comme illustré aux figures II.20 et II.22

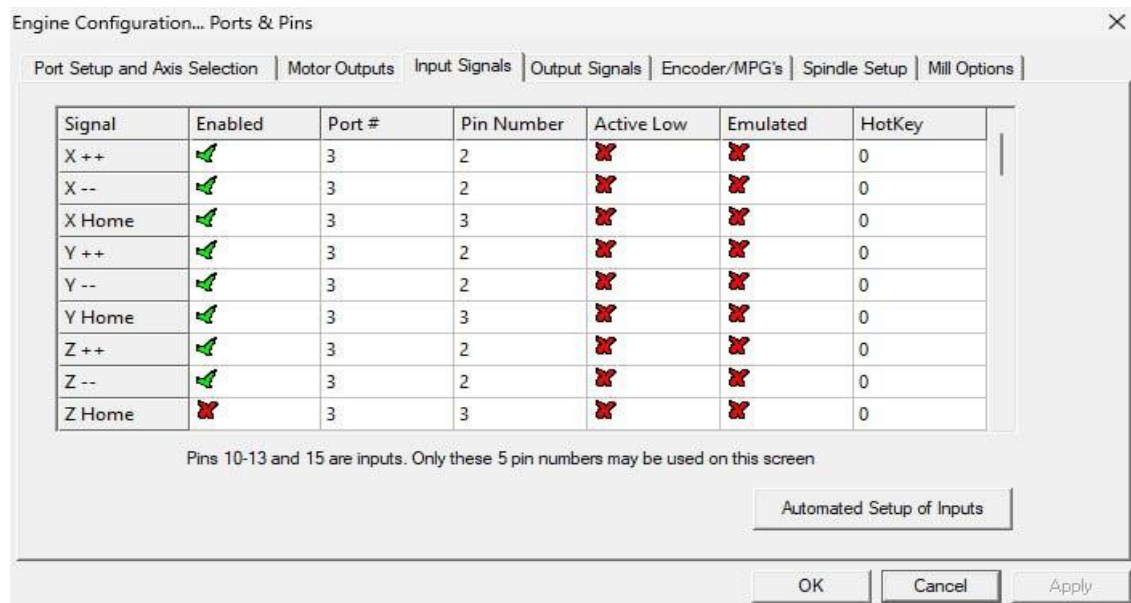


Figure II. 21 :les signaux d'entrées

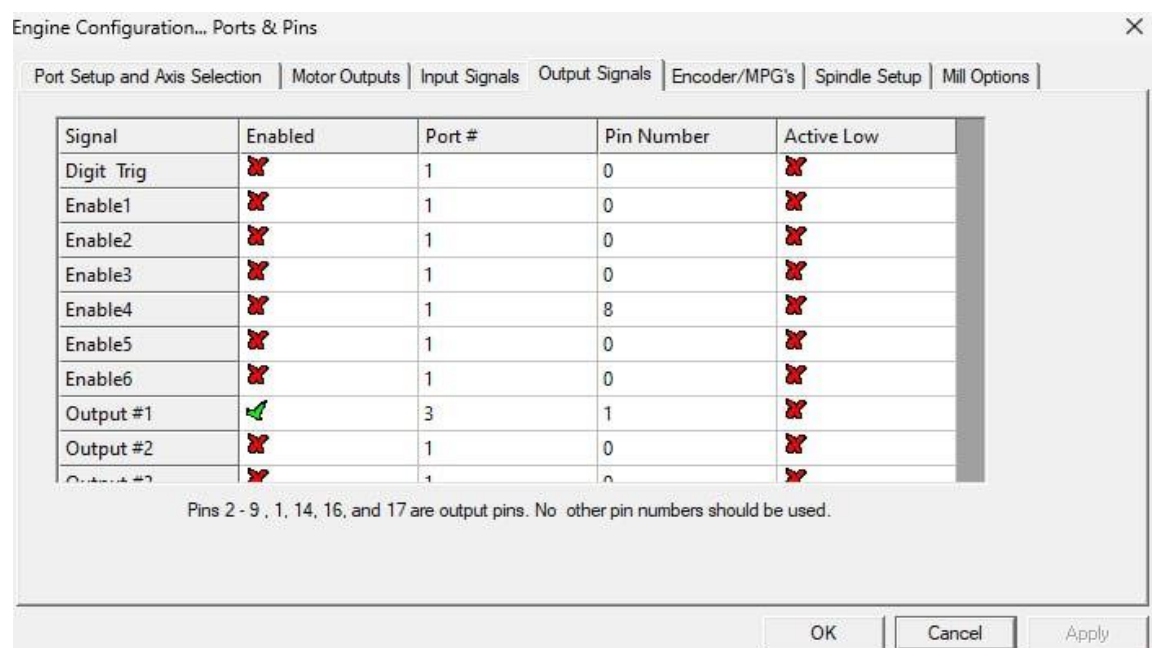


Figure II. 22 : les signaux de sorties.

II.3.6.3. Réglage et configuration des moteurs

Dans cette fenêtre, nous définissons la vitesse, l'accélération et la largeur des impulsions pour chaque axe.

En cliquant sur Setting, puis sur Axe Calibration (Set Steps per Unit), nous sélectionnons l'axe à calibrer. Les paramètres de vitesse et d'accélération sont déterminés par des essais effectués sur chaque axe.

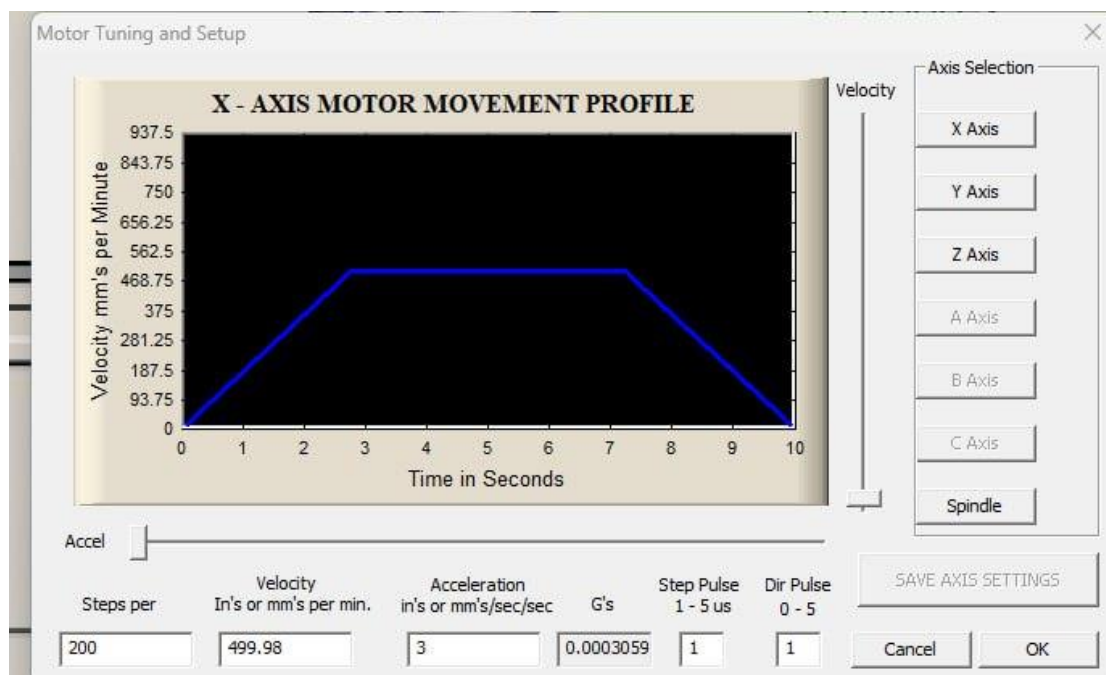


Figure II. 24 :Réglage et configuration du moteur

II.3.6.4. Configuration de la broche

L'onglet *Config > Ports & Pins > Spindle Setup* permet de définir les paramètres de contrôle de la broche et du liquide de refroidissement, comme illustré à la figure II.25.

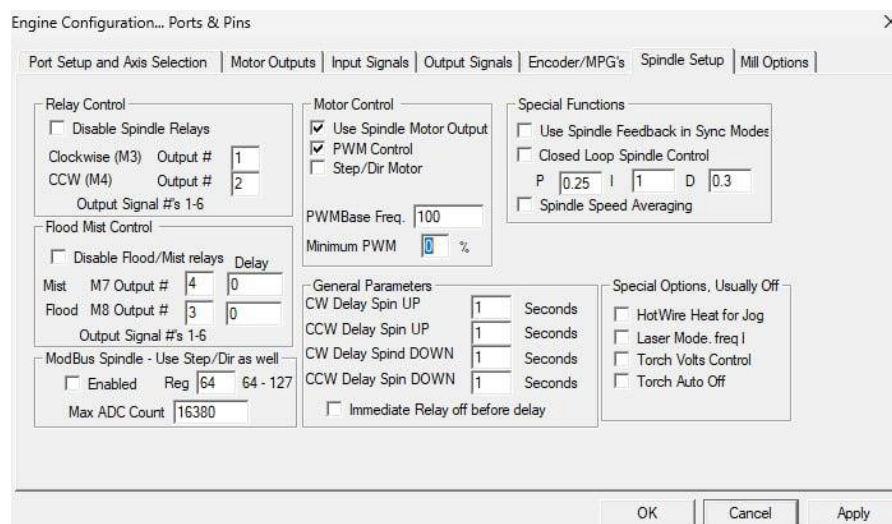


Figure II. 25 : configuration de la broche.

II.4. G-code

II.4.1. Introduction

La programmation en G-code consiste à décrire les opérations d'usinage à l'aide d'un langage codé compréhensible par l'unité de commande de la machine. Il s'agit du langage de programmation des machines-outils à commande numérique (MOCN). Ce langage est standardisé selon la norme ISO 1056, ce qui permet à certains codes d'avoir des fonctions identiques sur différents contrôleurs de machines-outils (NUM, FANUC, SIEMENS, etc.). Toutefois, certains

codes peuvent être interprétés différemment d'un contrôleur à un autre. Le langage de programmation des MOCN se caractérise par les éléments suivants [13]:

- L'ordonnancement des actions,
- L'appel des outils,
- La sélection des vitesses de coupe et d'avance,
- La définition des trajectoires,
- La spécification des coordonnées de fin de trajectoire,
- L'activation et la désactivation des éléments de la machine.

II.4.2. Structure d'un programme

La programmation suit le code ISO et se compose de lignes appelées "blocs". Chaque bloc regroupe les instructions correspondant à une séquence d'usinage. Un bloc est formé de plusieurs mots, chacun étant un ensemble de caractères comprenant une adresse suivie de chiffres représentant une information spécifique.

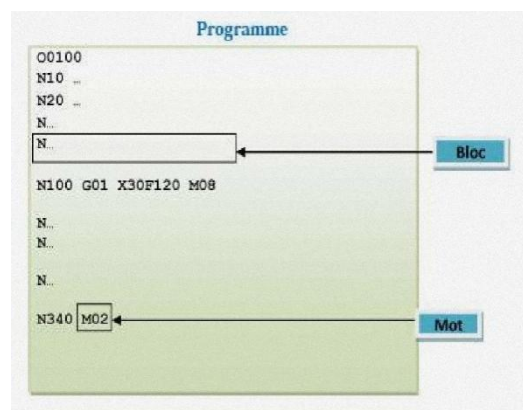


Figure II. 26 :Programme G-Code [13]

Bloc : Un bloc est un ensemble de mots contenant les instructions liées à une séquence d'usinage. La numérotation des blocs se fait généralement par incréments de 5 ou 10 afin de faciliter l'ajout éventuel de nouveaux blocs.

Exemple de bloc : Un bloc peut définir la mise en rotation de la broche.

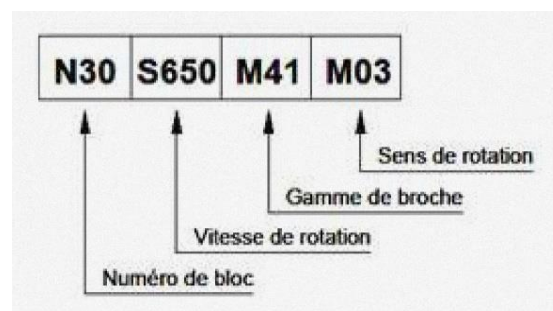


Figure II. 27 :Bloc de mise en rotaion [13]

Ecriture d'un bloc définissant une trajectoire

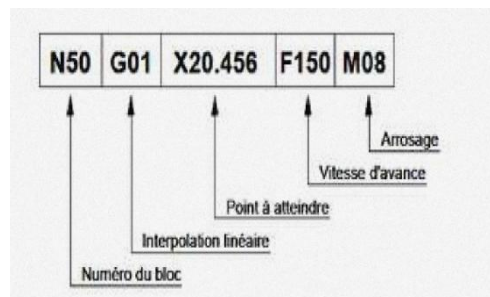


Figure II. 28 : Traduction G code [13]

Mot : Un mot est une suite de caractères comprenant une adresse suivie de chiffres, fournissant une information spécifique. *Exemple* : X 10.850

Adresse : Il s'agit d'une lettre placée en début de mot dans un langage machine, indiquant la fonction générale à exécuter.

Code	fonction
N	Numéro de ligne ou Numéro de bloc : repérage chronologique en début de ligne.
G	Fonctions préparatoires définissant la forme et les conditions de déplacement.
M	Fonctions auxiliaires donnant les changements d'état de la machine.
X...,Y...,Z...	Axes principaux désignant les coordonnées des points d'arrivée.
I..., J...,K...	Paramètres définissant les trajectoires circulaires (rayons).
R	Paramètres définissant les trajectoires circulaires.
F	Précise l'avance ou la vitesse d'avance. En millimètre/minute ou en millimètre/tour.
S	Précise la vitesse de coupe ou la vitesse de rotation de la broche en tr/min.
T	Symbole du numéro d'outil.

Tableau 1 : Signification des Fonctions .[14]

Code	Fonction
G17	Sélection du plan x-y
G18	Sélection du plan x-z
G19	Sélection du plan y-z
G20	Programmation en pouce
G21	Programmation en mm
G40	Désactivation de la compensation de rayon d'outil
G41	Compensation de rayon d'outil à gauche
G42	Compensation de rayon d'outil à droite
G28	Retour au point de référence
G94/G95	Déplacement en pouces par minute / pouces par tour
G96/G97	Vitesse de coupe constante / vitesse de rotation constante ou annulation de G96
G80	Annulation du cycle fixe
G4	Pause (1 seconde)

Tableau 2 : Fonction préparatoire fréquemment utilisées [14]

Code	Fonction
M00	Programme optionnel, arrêt automatique.
M01	Demande d'arrêt de programme en option
M02/M30	Fin du programme
M03	Rotation de la broche sens horaire
M04	Rotation de la broche sens anti-horaire
M05	Arrêtez la broche
M06	Changement d'outil

Tableau 3 : Signification des Fonctions auxiliaires. [14]

II.4.3. Structure d'un programme :

Un programme est la traduction, dans un langage compréhensible par le contrôleur numérique d'une machine, des opérations d'usinage à réaliser sur une pièce. On distingue plusieurs méthodes de programmation :

- **Programmation manuelle,**
- **Programmation assistée,** qui peut être :
 - Conversionnelle, via un contrôle numérique direct (*Direct Numerical Control*),
 - Assistée par ordinateur, à l'aide d'un logiciel de FAO (*Fabrication Assistée par Ordinateur* ou CAM en anglais).

Les documents nécessaires à la programmation incluent :

- Le dessin de définition,
- Le contrat de phase détaillant l'isostatisme et les paramètres de coupe,
- Le dossier technique de la machine.

Pour exécuter les différentes opérations d'usinage, un programme de commande numérique peut être structuré de diverses manières, en fonction de la complexité de la pièce à usiner :

- **Un programme principal,**
- **Un programme principal avec appels de séquences internes,**
- **Un programme principal accompagné de sous-programmes.**

Dans le cas d'une pièce simple ne nécessitant pas de cycles d'ébauche, un programme de commande numérique peut être structuré de manière plus directe.

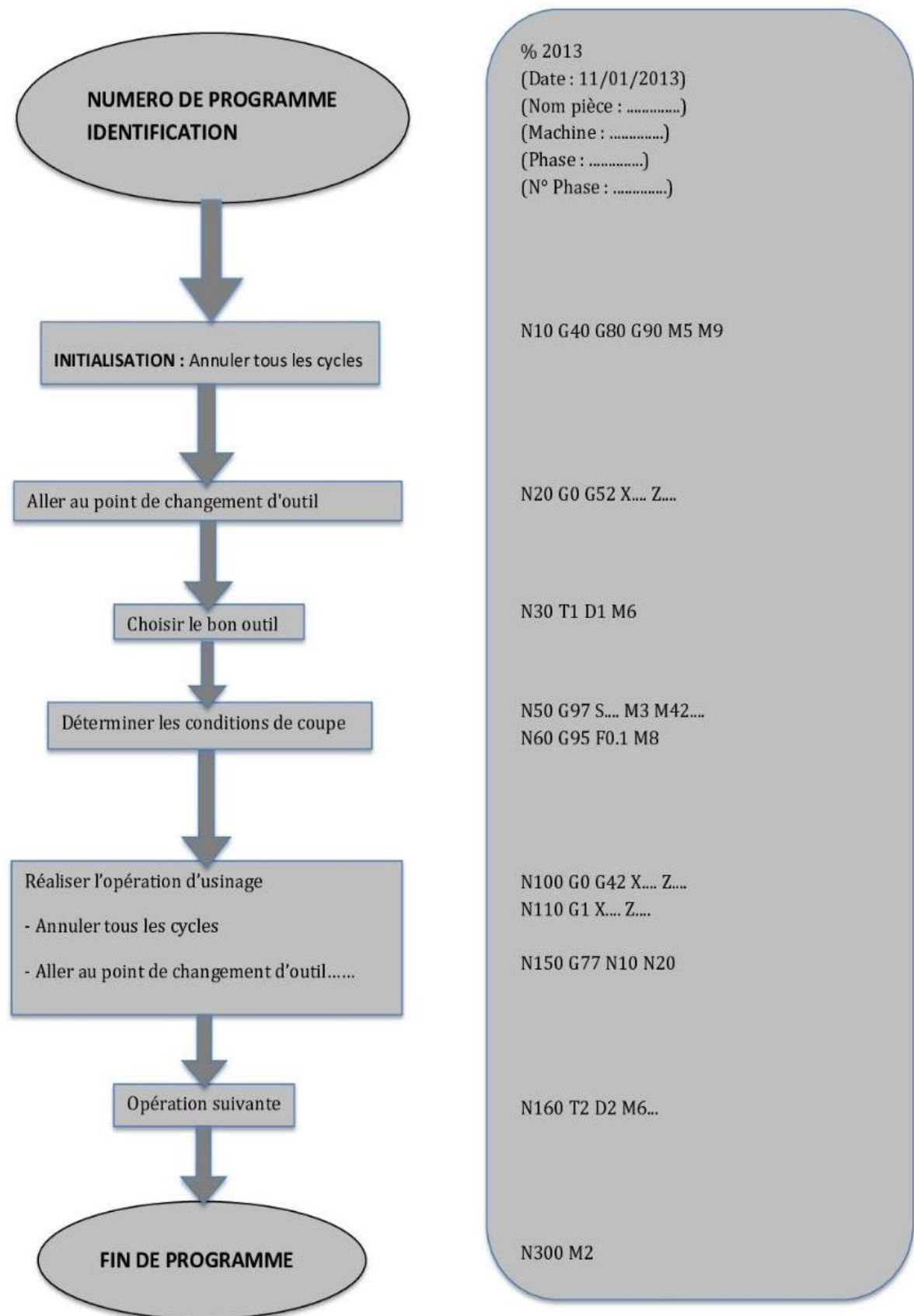


Figure II. 29 :Structure d'un G code .[13]

II.4.4. Logiciel de dessin (Aspire Vectric) :

Aspire Vectric est un logiciel conçu pour la création de pièces décoratives et artistiques en relief. En plus de proposer des outils de dessin et de modélisation, il intègre des fonctionnalités d'usinage en 2D et 3D ainsi que la gravure en V 3D. Ces fonctionnalités permettent de produire rapidement et facilement une grande variété de projets. La logique générale du flux de travail à suivre pour la plupart des tâches est illustrée dans le schéma ci-dessous :

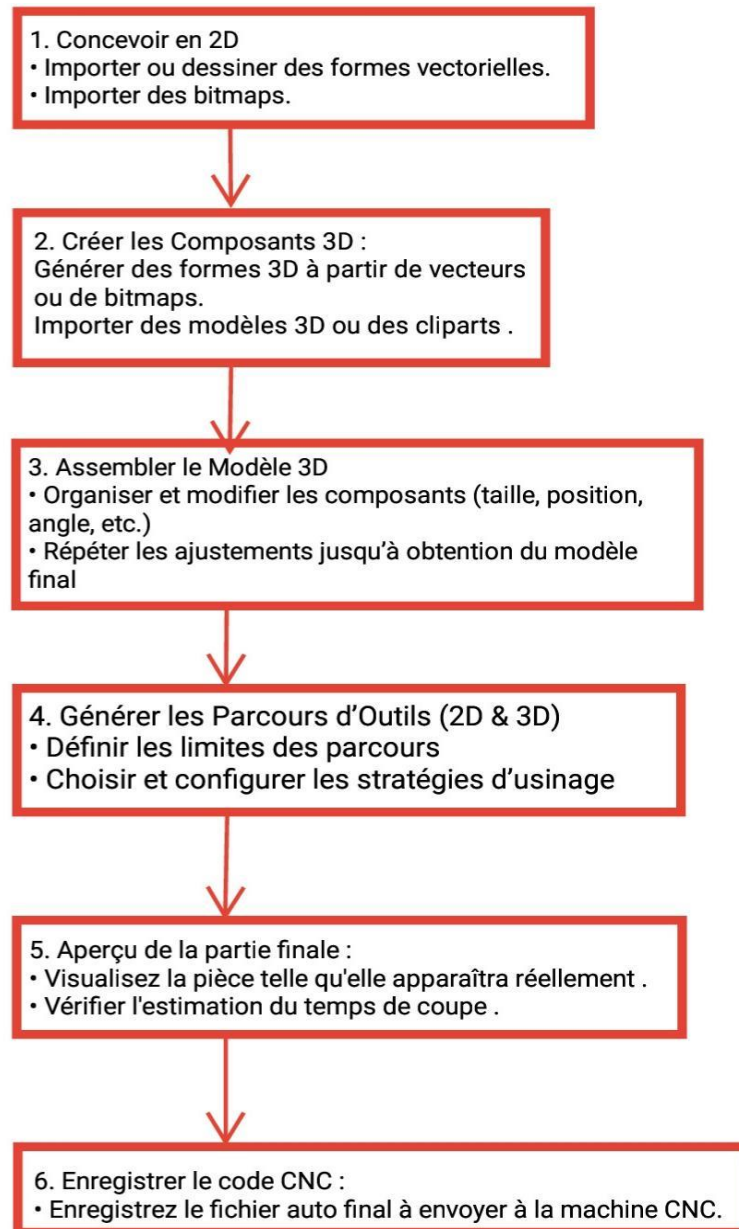


Figure II. 30 : Processus de Création de Pièces Sculptées : De la Modélisation à l'Usinage 3D.

II.4.4.1 Présentation de l'interface :

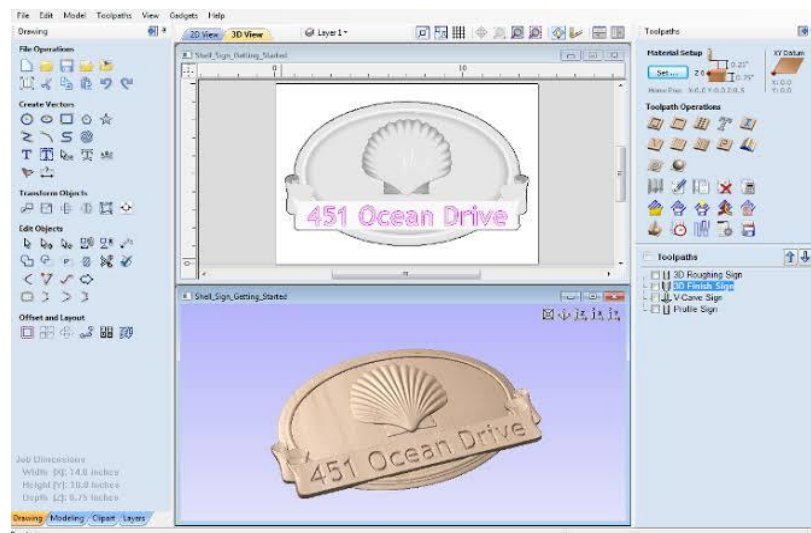


Figure II. 31 : Interface de Aspire Vectric .[15]

1. **La barre de menus principale** : Située en haut de l'écran, elle regroupe les commandes du logiciel organisées par fonction (Fichier, Édition, Modèle, Parcours d'outil, Affichage, Gadgets, Aide). En cliquant sur l'un de ces menus, une liste déroulante affiche les commandes disponibles.
2. **Le panneau de conception** : Placé sur le côté gauche de l'écran, il offre un accès aux onglets **Dessin**, **Modélisation**, **Clipart** et **Calques**.
 - **L'onglet Dessin** contient des outils pour créer, modifier, dimensionner et aligner des vecteurs.
 - **L'onglet Modélisation** rassemble les outils liés à la gestion des composants 3D et affiche l'arborescence des composants, permettant de visualiser et d'organiser les éléments du modèle 3D composite final.
 - **L'onglet Clipart** offre un accès visuel pratique aux modèles 3D enregistrés sur votre ordinateur.
 - **L'onglet Calques** facilite la gestion des différentes couches dans votre projet.
3. **L'onglet Trajectoire d'outil** : Situé sur le côté droit de l'écran, il est divisé en deux parties :
 - La partie supérieure regroupe les icônes permettant de créer, modifier et prévisualiser les parcours d'outils.
 - La partie inférieure affiche la liste des parcours d'outils déjà créés.
4. **La fenêtre de conception 2D** : C'est la zone où sont dessinées, modifiées et sélectionnées les conceptions prêtes pour l'usinage. Les conceptions peuvent être importées ou créées directement dans Aspire. Cette fenêtre partage l'espace avec la vue 3D ; vous pouvez basculer entre ces deux affichages à l'aide des touches **F2** et **F3** ou via les onglets situés en haut de la fenêtre.
5. **La vue 3D** : Cet espace affiche le modèle 3D composite, les parcours d'outils et

leur aperçu.

6. **Disposition de l'interface** : Pour afficher simultanément les vues 2D et 3D ou vous concentrer sur l'onglet Trajectoire d'outils à une étape précise, vous pouvez utiliser les boutons de disposition disponibles dans la section **Contrôle de la vue 2D** de l'onglet Dessin. [15]

II.4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons d'abord étudié les moteurs pas à pas, en présentant leurs différents types, leurs modes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients. Cette analyse a permis de mieux comprendre leur rôle crucial dans le contrôle précis des mouvements des machines CNC. Ensuite, nous avons exploré la carte Mach3 en détaillant son logiciel de configuration et son langage de programmation, le code G, qui permet de piloter efficacement ces moteurs. Enfin, nous avons introduit le logiciel Aspire Vectric, en mettant en avant ses fonctionnalités clés et son importance dans la création de modèles et la génération de parcours d'outils. L'ensemble de ces éléments constitue une base essentielle pour la conception et la programmation des machines CNC.

Chapitre III

Conception et simulation d'une machine CNC

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les composants de notre machine CNC, réaliserons des schémas électriques globaux et présenterons des modèles de pièces ainsi que des assemblages conçus à l'aide du logiciel SolidWorks. L'assemblage virtuel nous aidera à identifier d'éventuels défauts dans la structure de la machine.

III.2. Les composants mécaniques et électriques essentiels :

III.2.1. Les composants mécaniques :

III.2.1.1. Les paliers :

Les paliers sont des éléments essentiels en construction mécanique, conçus pour soutenir et guider en rotation les arbres de transmission.

Selon l'application souhaitée, ils peuvent être :

Lisses : les arbres reposent sur des coussinets, générant un frottement de glissement entre les surfaces en contact.

À roulement : le contact s'établit par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux logés dans des cages. Ce type de palier présente une résistance au roulement (souvent appelée à tort « frottement de roulement »), permettant de supporter des charges plus élevées et d'atteindre des vitesses de rotation plus importantes.[7]



Figure III.1 :palier a roulement

III.2.1.2. Accouplement :

En mécanique, un accouplement, ou joint de transmission, est un dispositif permettant de relier deux arbres en rotation afin de transmettre un couple.

Il peut prendre différentes formes, notamment :

- Accouplement élastique
- Accouplement à membranes
- Accouplement à denture métallique
- Accouplement à soufflet

Dans notre système, nous avons utilisé des accouplements articulés pour relier

les moteurs pas à pas à la vis à billes. Ces accouplements offrent une correction efficace des défauts d'alignement importants ainsi que des décalages angulaires. Ils sont composés de deux bagues solidaires et d'un patin, relié aux bagues par deux liaisons prismatiques.[1]



Figure III.2 : Accouplement [1]

III.2.1.3. Glissière

Une glissière est une pièce conçue pour guider le mouvement glissant d'un élément mobile, garantissant ainsi une translation fluide et précise.

Dans notre système, chaque axe est équipé de quatre glissières. Ces chariots assurent le support de la charge exercée sur la table, tout en réduisant les frottements et en améliorant la stabilité du mouvement. Cette configuration permet d'optimiser la précision et la durabilité du mécanisme.[6]



Figure III.3 : glissière[6]

III.2.1.4. Rail

Un rail est un profilé métallique servant de guide pour un mouvement de translation, assurant ainsi un déplacement précis et fluide des éléments mobiles.

Dans notre système, les rails jouent un rôle essentiel en guidant les chariots le long des axes, minimisant les frottements et garantissant une meilleure stabilité et précision des déplacements. Ils contribuent également à la rigidité et à la durabilité de l'ensemble du mécanisme.[2]



Figure III.4 :Rail [2]

III.2.1.5. Tige filetée :

En mécanique, une tige filetée est l'élément mâle d'un système vis/écrou, utilisé soit pour l'assemblage de pièces, soit pour la transformation de mouvement. Son complément, l'élément femelle, est l'écrou, et l'ensemble formé par la vis et l'écrou constitue un boulon.

Cette tige est composée d'un noyau de section circulaire, sur lequel un filetage est généré par le balayage d'une section le long d'une hélice. Généralement fabriquée en métal, elle peut également être conçue en plastique dur pour des applications spécifiques, notamment dans l'industrie de précision ou lorsque des contraintes techniques comme la légèreté doivent être prises en compte.[16]



Figure III.5 : Tige Filleté[16]

III.2.2. Les composants électriques :

III.2.2.1. Caractéristiques de la Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2 :

Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2 offre plusieurs fonctionnalités avancées qui la rendent adaptée aux systèmes de commande CNC :

1. **Prise en charge du contrôle 4 axes** : possibilité de connecter jusqu'à quatre moteurs pas à pas ou servomoteurs.
2. **Fréquence maximale des impulsions de pas** : 100 kHz, compatible avec les moteurs pas à pas et servomoteurs.
3. **Entrées isolées par optocoupleurs** : permet la connexion d'interrupteurs de fin de course, d'un bouton d'arrêt d'urgence, d'une sonde de mise à zéro automatique de l'outil, d'un capteur de position d'origine, etc.
4. Prise en charge des manivelles électroniques (handwheel) pour un contrôle manuel précis.

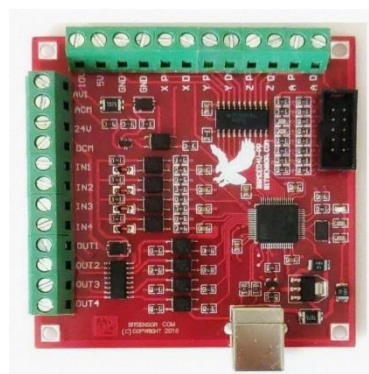


Figure III.6 : La Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2 [17]

5. **Commande de broche** : compatible avec les modes PWM et relais.
6. Sortie de signal 0-10V, permettant le contrôle de la vitesse du moteur de broche via le logiciel Mach3.
7. Interface de sortie à relais isolée, pouvant piloter jusqu'à quatre relais pour le contrôle du démarrage de la broche, des rotations avant/arrière, des pompes ou d'autres dispositifs.
8. Interface USB, compatible avec les ordinateurs portables, tablettes, PC de bureau et netbooks équipés de ports USB.
9. Indicateurs LED embarqués, affichant l'état de connexion et de fonctionnement.

10. Jusqu'à 12 entrées numériques disponibles.
11. Axe esclave avec auto-nivellement lors du référencement à l'origine.
12. Prise en charge du référencement automatique (retour à zéro).
13. **Compatibilité avec les systèmes d'exploitation :** Windows XP, Windows 7 (32/64 bits), Windows 8 et Windows 10. [17]

Cette carte constitue une solution efficace pour l'interfaçage entre le logiciel Mach3 et les composants d'une machine CNC, offrant une connectivité simple et des fonctionnalités avancées pour une utilisation optimale.

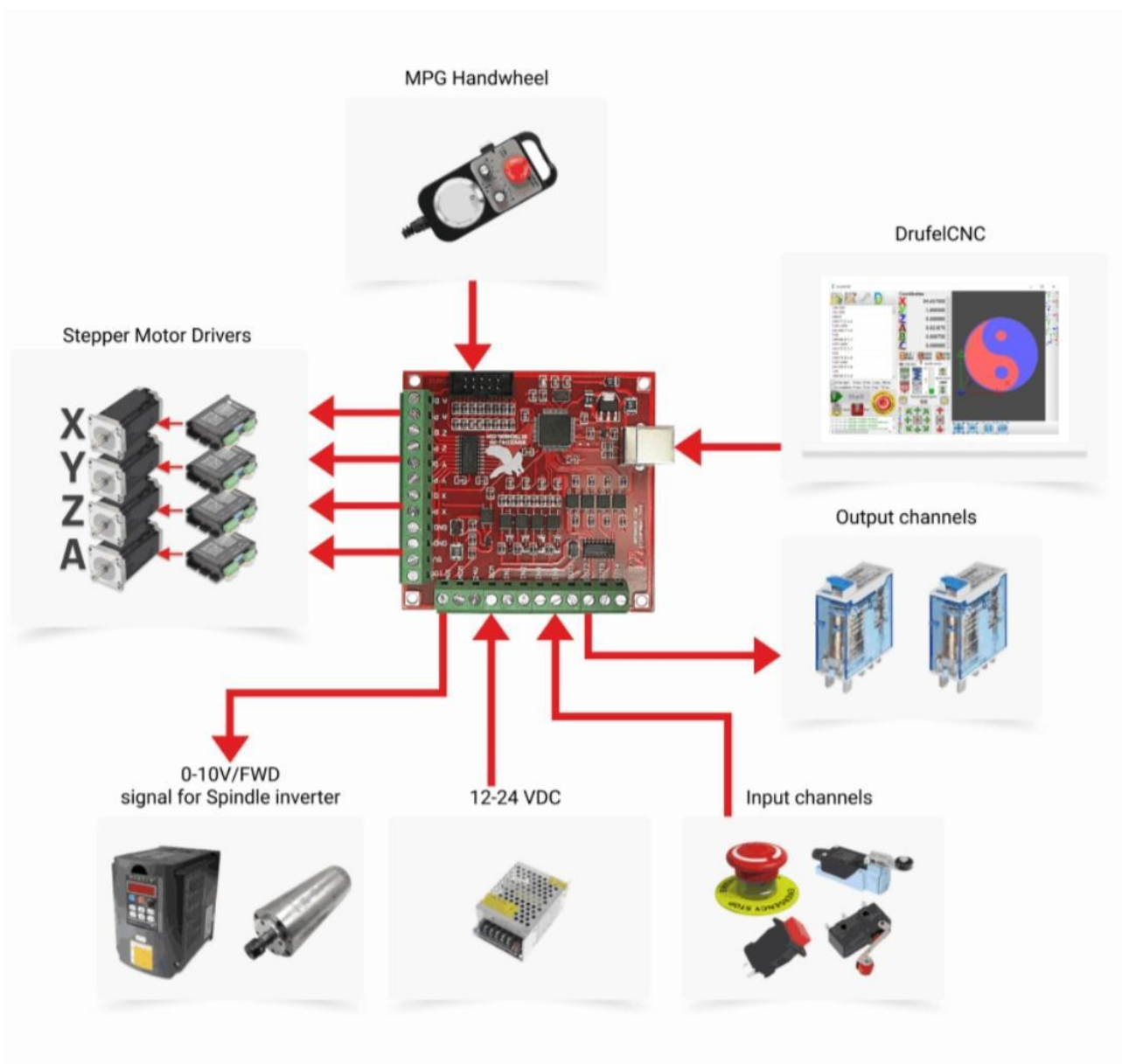


Figure III.7 : Schéma de connexion de base de la carte Mach 3. [17]

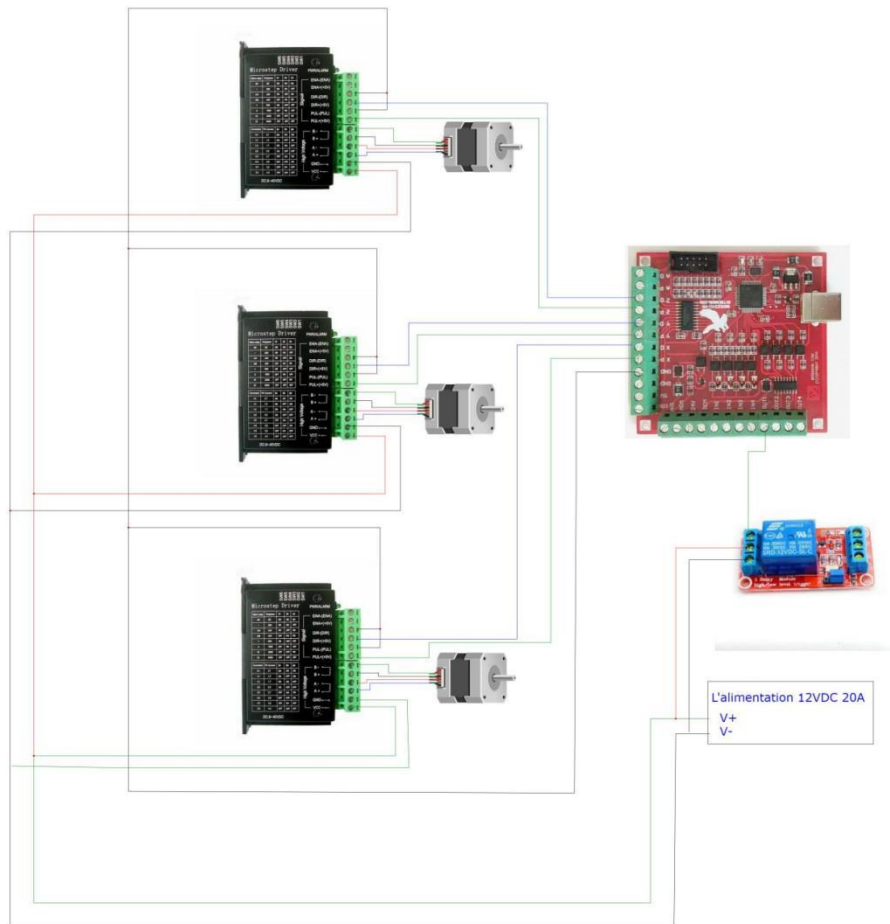


Figure III.8 : Schéma de connexion des moteurs pas à pas et de le relais.

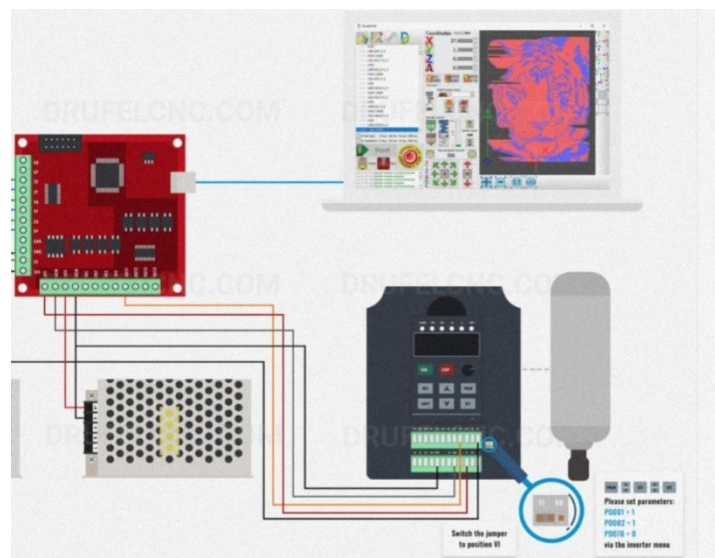


Figure III.9 : Schéma de connexion de la broche [17]

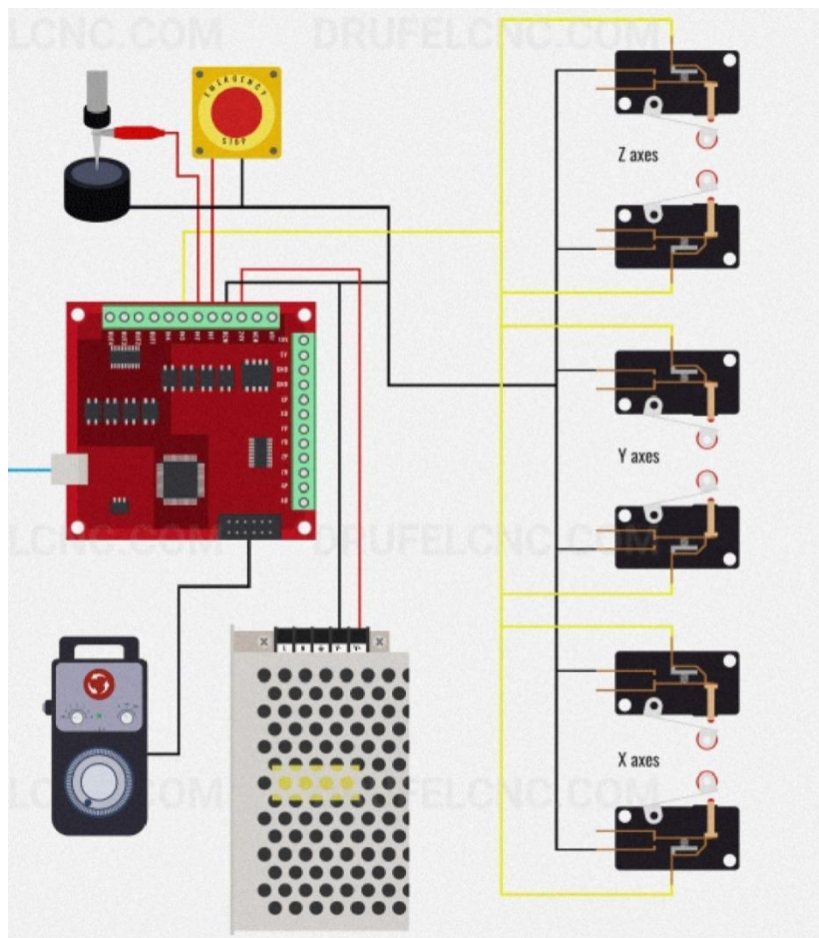


Figure III.10 : Schéma de connexion des fins de course [17]

III.2.2.2. Les pilotes :

Pilotes de Moteur (Motor Drivers – A4988 & DRV8825 & TMC 22209 V1.2 & TB6600) : Ces pilotes régulent les moteurs pas à pas en gérant l'alimentation en courant et la précision du mouvement.

III.2.2.2.1. Les Caractéristiques DRV8825 :

- Contrôle Avancé du Microstepping
 - Indexeur de micro-pas intégré pour un contrôle précis du moteur
 - Prend en charge jusqu'à 1/32 micro-pas pour des mouvements plus fluides et une réduction du bruit.
 - Gestion Robuste de l'Alimentation et du Courant
 - Large plage de tension de fonctionnement : **8,2 V à 45 V**
 - Capable de fournir jusqu'à 2,5 A de courant maximal à **24 V** et **T_A = 25°C**
- [18]

Fonctionnalités de Protection Complètes

Protection contre les surintensités (OCP) pour éviter les dommages dus à un courant excessif

Arrêt thermique (TSD) pour une protection automatique en cas de surchauffe

protection contre sous-tension (UVLO) garantissant un fonctionnement stable lors des baisses de tension

Broche d'indication de défaut (nFAULT) pour la détection et le diagnostic en temps

réel des erreurs. [18]

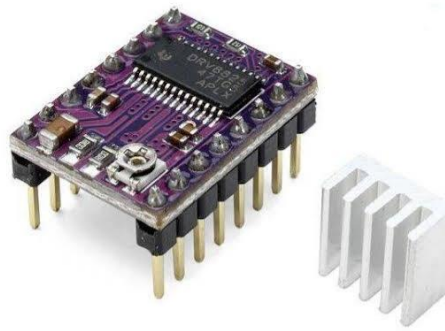


Figure III.11 : Pilote de Moteur Pas à Pas DRV8825[18]

III.2.2.2.2. Les Caractéristiques de A4988 :

Puissance et Performances

- Sortie 35V, 2A pour un contrôle moteur puissant.
- **Faible RDS(ON)** pour réduire les pertes de puissance.
- **Régulateur à Temps Mort Fixe** pour un contrôle stable du courant.
- **Mode de Décroissance Automatique :**
 - **Décroissance Mixte** pour une meilleure précision et moins de bruit.
 - **Décroissance Lente** pour une régulation stable du courant. [19]

Contrôle du Pas

Traducteur Intégré pour un contrôle simplifié par impulsion.

Aucun Tableau de Séquence de Phases Nécessaire pour une configuration plus facile.

5 Modes de Pas : Plein, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16.

Protection et Sécurité

- **Redressement Synchrone** pour une consommation d'énergie optimisée.
- **UVLO, Arrêt Thermique et Protection contre les Courts-Circuits** pour une sécurité renforcée.
- **Protection contre les Courants Croisés** pour éviter les conflits de commutation. [19]

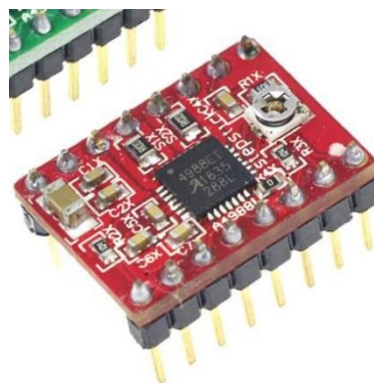


Figure III.12 : Pilote de Moteur Pas à Pas A4988 [19]

III.2.2.2.3. Les Caractéristiques de TB6600 :

Caractéristiques :

- Prise en charge de 8 types de contrôle de courant
- Prise en charge de 7 niveaux de micro-pas réglables
- Interface avec isolation par optocoupleur haute vitesse
- Dissipateur thermique de grande surface.
- Capacité de résistance aux interférences haute fréquence
- Protection contre l'inversion de polarité à l'entrée
- Protection contre la surchauffe, la surintensité et les courts-circuits. [21]

Spécifications :

- Courant d'entrée : 0~5A
- Courant de sortie : 0,5~4,0A
- Signal de commande : 3,3~24V
- Puissance (MAX) : 160W
- Micro-pas : 1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
- Température : -10~45°C
- Dimensions : 96×56×33 mm / 3,78×2,2×1,3 pouces
- Poids : 0,2 kg
- Circuit intégré de commande : TB67S109AFTG [21]

Remarque :

Les modes 2/A et 2/B correspondent à deux variantes du mode demi-pas (1/2 pas) propres au circuit TB67S109AFTG. Ils offrent des profils de courant différents pour optimiser le fonctionnement selon les besoins : réduction du bruit, meilleur couple ou fluidité du mouvement



Figure III.14 : Pilote de Moteur Pas à Pas TB6600.[21]

III.2.2.2.4. Les Caractéristiques TMC2209 :

- Courant de Conduction (RMS) : 2A
- **Courant de Crête** : 2.8A (supérieur de 0.6A à 0.8A par rapport au TMC2208)
- **Fonction Supplémentaire** : Test de blocage du moteur
- **Alimentation & Tension** :
 - **Plage de Tension (VM)** : 4.75V - 28V DC

- **Paramètres de Micro-pas :**
 - **Options :** 2, 4, 8, 16 , 32 , 64 (extensible jusqu'à 256 via l'interpolation)
 - **Micro-pas Maximum :** 256
- **Technologies Clés :**
 - **SpreadCycle™ :** Hacheur de contrôle moteur dynamique
 - **StealthChop2™ :** Technologie ultra-silencieuse
 - **MicroPlyer™ :** Fournit jusqu'à 256 micro-pas
 - **StallGuard4™ :** Détection des rotations anormales du moteur
 - **CoolStep™ :** Contrôle dynamique du courant (économie d'énergie jusqu'à 75%). [20]

Autres Caractéristiques :

- 1) Il présente une grande résistance à la perte de pas.
- 2) Mode ultra-silencieux.
- 3) Il est équipé d'un dissipateur thermique de grande surface, permettant de réduire efficacement la température pendant le fonctionnement du pilote.
- 4) Il permet de prévenir les vibrations du moteur
- 5) Le module prend en charge le test de moteur bloqué.

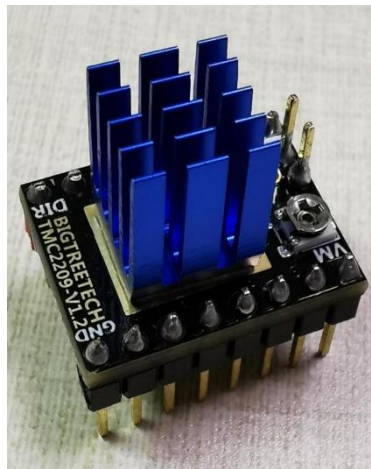


Figure III.15 : Pilote de Moteur Pas à Pas TMC2209 [20]

III.2.2.2.5. Pourquoi Choisir le TMC2209 ?

Le TMC2209 est idéal pour ma CNC grâce à ses nombreux avantages :

- **Précision supérieure :** Jusqu'à **256 micro-pas** pour des mouvements fluides et précis.
- **Silence optimal :** La technologie **StealthChop2™** réduit considérablement le bruit.
- **Efficacité énergétique :** **CoolStep™** diminue la consommation jusqu'à **75%**, limitant la chauffe.
- **Protection avancée :** **StallGuard4™** détecte les blocages sans capteur.

- **Prix plus abordable** : Malgré ses technologies avancées, le TMC2209 est généralement moins cher que le TB6600, ce qui en fait une option à la fois économique et performante.

Ces atouts font du TMC2209 le choix idéal pour une CNC performante, fiable et durable.

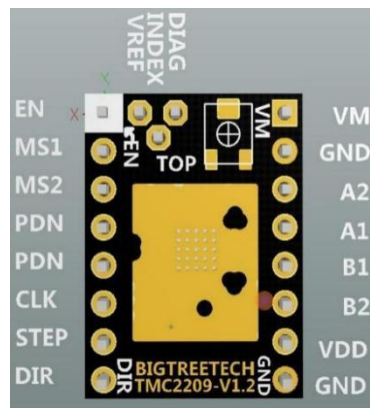


Figure III.16 : Désignation des broches du pilote TMC2209. [20]

J1	Mode	J2	Mode
(EN)	Activation	(VM)	Tension d'alimentation
(MS1)	Réglage micro-pas	(GND)	Masse
(MS2)	Réglage micro-pas	(A2)	Phase A
(PDN)	UART	(A1)	Phase A
(PDN)	UART	(B1)	Phase B
(CLK)	Horloge	(B2)	Phase B
(STEP)	Entrée d'impulsions	(VCC_IO)	Tension logique
(DIR)	Entrée de direction	(GND)	Masse
DIAG	Sortie de diagnostic et de détection de blocage (StallGuard). Niveau haut en cas de blocage ou erreur du pilote. Réinitialisation de l'erreur si ENN=haut.		
VREF	Tension de référence analogique pour le réglage du courant ou l'utilisation de résistances internes de détection (mode optionnel).		
INDEX	Sortie d'index configurable. Fournit une impulsion d'index.		

Tableau 4 : Mode des broches du pilote TMC2209 [20]

MS1/MS2 Configuration de la résolution de Micro-pas pour l'entrée d'impulsions		
MS2	MS1	Le paramètre de Micro-pas
GND	GND	8 micro-pas
GND	VCC_IO	32 micro-pas
VCC_IO	GND	64 micro-pas
VCC_IO	VCC_IO	16 micro-pas

Tableau 5 : Paramètres de Micro-pas de TMC 2209 V1.2 [20]

III.2.2.3. Les moteurs pas à pas :

Les moteurs pas à pas se distinguent des moteurs classiques par leur mode de commande. Ils permettent de convertir un signal électrique numérique en un mouvement angulaire. Chaque impulsion envoyée par le système de commande au module de puissance entraîne la rotation du moteur d'un pas déterminé.



Figure III.17 : Moteur Pas à Pas.

Méthodologie du calcul et de sélection d'un moteur pas à pas approprié :

Le choix du moteur pas à pas approprié est une étape cruciale dans la conception de tout système de commande de mouvement de précision. Il garantit non seulement la précision et l'efficacité du fonctionnement, mais aussi la fiabilité et la durabilité de la machine. Ce processus de sélection repose sur une série de calculs techniques visant à adapter le couple, la vitesse, la résolution et l'inertie du moteur aux exigences de la charge mécanique et du profil de mouvement.

En comprenant et en appliquant ces calculs — notamment l'analyse des besoins en mouvement (déplacement, accélération, décélération), l'évaluation des caractéristiques couple/vitesse du moteur, la détermination de l'inertie de la charge, ainsi que le choix éventuel d'un rapport de réduction via un réducteur ou une courroie — les ingénieurs peuvent prendre des décisions éclairées pour optimiser les performances du moteur et l'intégration du système global.

Il est également essentiel de tenir compte des conditions environnantes, comme la température ambiante, les contraintes spatiales, les limitations électriques (tension et courant disponibles), ainsi que les modes de pilotage du moteur (ondulation micro-pas, pleine onde, demi-onde, etc.). Ces paramètres influencent

directement le comportement dynamique du moteur, en particulier son couple disponible en régime transitoire et permanent.

Ce guide présente une méthode structurée pour calculer les paramètres nécessaires et choisir le moteur pas à pas le mieux adapté à notre application, en tenant compte des spécificités mécaniques, électriques et dynamiques du système. L'objectif final est d'assurer un fonctionnement optimal sans risque de perte de pas, de surchauffe ou de sous-utilisation des capacités du moteur.

Dans notre cas :

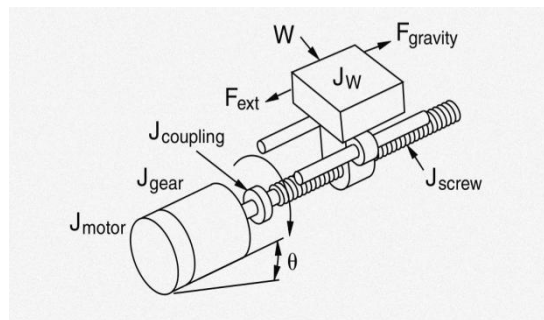


Figure II.18 : Schéma d'un système d'actionneur

à vis à billes et ses paramètres. [22]

W : Poids [lb]

L : Longueur de la vis à billes [pouce]

d_{load} : Diamètre de l'arbre de la vis à billes ou pas de la vis [pouce] ou [pouce/tr]

P : Pas [tr/pouce]

k : Résolution du moteur [impulsion/tr]

I : Rapport de réduction

P_C : Précision calculée [pouce/step]

P_D : Précision souhaitée [pouce/step]

L_S : Longueur de la course [pouce]

a : Nombre de révolutions nécessaires pour le déplacement de la charge sur la course [rev]

P_{total} : Nombre total d'impulsions nécessaires pour déplacer la charge sur la course [pulses]

T_{total} : Temps de déplacement (temps total pour parcourir une course) [s]

F_{start} : Fréquence ou vitesse de départ [Hz]

T_{ramp} : Temps d'accélération ou de décélération [s]

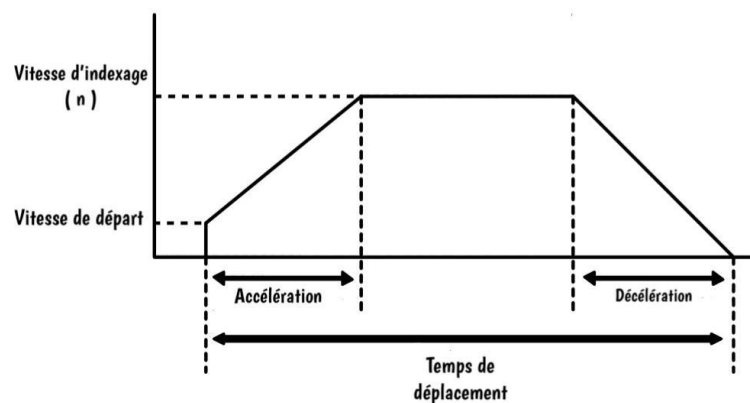


Figure III.19 : Profil de vitesse trapézoïdal utilisé pour le contrôle du mouvement d'un moteur pas à pas [22]

Données typiques de certains matériaux [22] :

Matériau	Rendement ϵ
Écrou à billes	0.9
Vis trapézoïdale avec écrou en plastique.	0.65
Vis trapézoïdale avec écrou en métal	0.40

Matériau	Coefficient de frottement (μ)
Acier sur acier	0.580
Acier sur acier (lubrifié)	0,150
Téflon sur acier	0.04
Douille à billes	0.003

f_{trap} : Fréquence d'indexation [Hz]

n ou Δ_{rpm} : Vitesse de rotation du moteur pas à pas [tr/min]

g : Gravité (valeur standard) = 386 [in/s²]

e : Rendement

μ : Coefficient de frottement

F_{ext} : Forces extérieures [lb]

ρ : Masse volumique [lb/pouce³]

θ : Angle d'inclinaison [°]

$T_{preload}$: Couple de précharge (généralement nul) [lb·pouce]

T_{accel} : Couple moteur nécessaire pour accélérer et décélérer l'inertie totale du système [lb·pouce]

J_W : Inertie de la charge [lb·pouce·s²]

J_{screw} : Inertie de la vis à billes. [lb·pouce·s²]



Figure III.20 : Vis à billes .

Remarque :

1. Livre (lb)

1 lb $\approx$ 0,4536 kilogramme (kg)

2. Pouce (in)

1 pouce = 25,4 millimètres (mm) Ou 0,0254 mètre (m).

Étape 1 : Définir les exigences de l'actionneur et du mouvement :

Poids de la table et de la pièce : W

Angle d'inclinaison : θ

Coefficient de frottement des surfaces de glissement : μ

Force de charge externe : F_{ext}

Diamètre de l'arbre de la vis à billes : d_{load}

Longueur de la vis à billes : L

Matériau de la vis à billes

Pas de la vis à billes : [pouce/tr] (toujours est égale d_{load})

Le pas : $P = 1 \div d_{load}$

Résolution de positionnement souhaitée : P_D

Rapport de réduction du réducteur : i (valeur préliminaire ; pour un rapport 3:1, $i = 3$)

Longueur de la course : L_S

Temps total de déplacement : T_{total}

Temps d'accélération et de décélération : T_{ramp}

Rendement de la vis à billes : e

Inerties de l'accouplement et du réducteur [généralement : $J_{coupling} = 0$,
 $J_{gear} = 0$]

Étape 2 : Déterminer la résolution de positionnement de la charge :

Vérifiez si k impulsions/tr permettent d'atteindre la précision souhaitée :

Donc,

$$P_C = d_{load} / (k \times i) = [\text{pouce/step}]$$

Il faut que :

Précision calculée < Précision souhaitée

$$P_C < P_D$$

Combien d'impulsions sont nécessaires pour le déplacement ?

$$a = (L_S - d_{load}) \times i$$

a : Nombre de révolutions nécessaires pour déplacer la charge sur la course.

Étape 3 : Déterminer le profil de mouvement :

$$P_{total} = K \times a$$

Déterminez le profil de mouvement :

La fréquence d'indexation pour un mouvement trapézoïdal est :

$$f_{TRAP} = (P_{total} - (f_{start} \times t_{ramp})) \div (t_{total} - t_{ramp})$$

$$n = (f_{TRAP} / k) \times 60$$

Étape 4 : Déterminer le couple moteur requis :

Utilisez les équations du Tableau 1 :

L'inertie totale vue par le moteur est la somme de toutes les inerties :

$$J_{total} = J_{motor} + J_{gear} + ((J_{coupling} + J_{screw} + J_W) \div i^2)$$

Hypothèse : les inerties du réducteur et de l'accouplement sont nulles.

Inertie de la charge :

g : gravité

$$J_W = (W \div (g \times e)) \times (0.5 \times \pi \times P)^2$$

$$\text{où } P = 1 \div d_{\text{load}}$$

Inertie de la vis à billes :

$$J_{\text{screw}} = (\pi \times L \times \rho \times r_{\text{load}}^4) \div (2 \times g)$$

Inertie ramenée au moteur :

$$J_{\text{screw} + \text{load}} = ((J_{\text{screw}} + J_W) \div i^2) = J_{\text{total}} - J_{\text{motor}} = [\text{lb} \cdot \text{in} \cdot \text{s}^2]$$

Couple dynamique requis :

$$T_{\text{accel}} = J_{\text{screw} + \text{load}} \times ((\Delta \text{rpm} \div \Delta \text{time}) \times (2\pi \div 60)) = [\text{lb} \cdot \text{in}]$$

$$\Delta \text{time} = t_{\text{ramp}} \div 2$$

$$\Delta \text{rpm} = n$$

Déterminer le couple de fonctionnement (couple de frottement) :

$$F_{\text{total}} = F_{\text{ext}} + F_{\text{friction}} + F_{\text{gravity}}$$

$$F_{\text{gravity}} = W \times \sin(\theta)$$

$$F_{\text{friction}} = \mu \times W \times \cos(\theta)$$

$$F_{\text{ext}} = 0$$

Formule :

$$T_{\text{run}} = ((F_{\text{total}} \div (2 \times \pi \times P)) + T_{\text{preload}}) \div i = [\text{lb} \cdot \text{in}]$$

$$T_{\text{preload}} = 0$$

Hypothèse : le couple de précharge est nul.

Couple moteur minimal requis à la vitesse n :

$$T_{\text{motor}} = T_{\text{accel}} + T_{\text{run}} = [\text{lb} \cdot \text{in}]$$

Note : Ce couple est calculé avant la sélection du moteur et sans inclure l'inertie du rotor moteur.

Étape 5 : Sélectionner et valider le moteur pas à pas et son pilote :

Critères courants de sélection :

- Tenir compte du couple calculé du moteur.
- Garder le rapport inertie charge / inertie moteur inférieur à 10.

- Utiliser la formule suivante pour le calcul :

$$J_{\text{screw} + \text{load}} \div J_{\text{motor}} < 10$$

L'inertie du moteur se trouve dans la fiche technique du fabricant.

- Nous consultons les courbes couple/vitesse du moteur et identifions le couple correspondant à la fréquence d'indexation pour un mouvement trapézoïdal. Si ce couple est supérieur ou égal au couple calculé, nous recherchons ensuite l'inertie du moteur et vérifions si :

$$J_{\text{screw} + \text{load}} \div J_{\text{motor}} < 10 \quad [22]$$

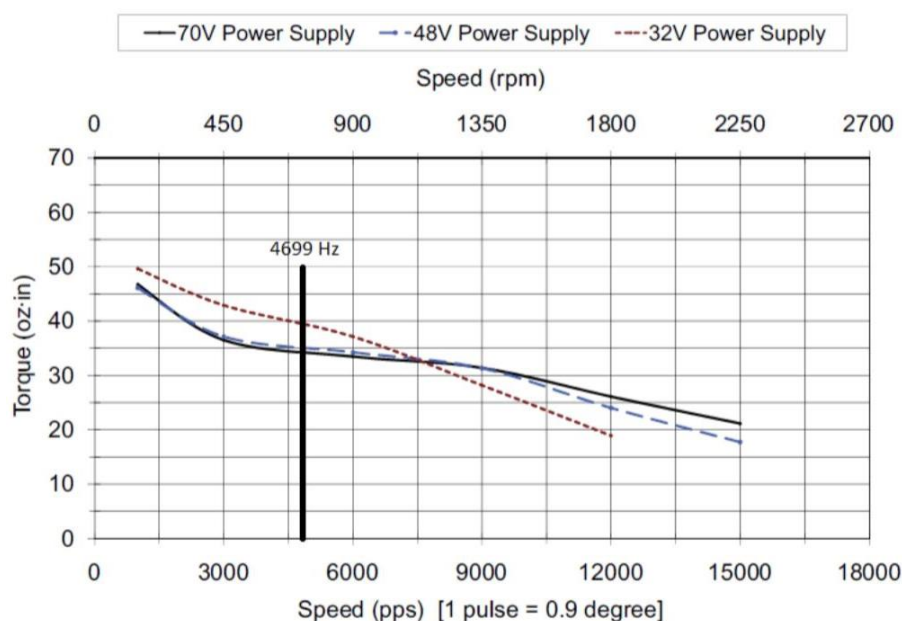


Figure III.21 : un exemple sur la courbe couple/vitesse du moteur pas à pas.[22]

III.2.2.4. L'Alimentation :

Le bloc d'alimentation, souvent appelé simplement l'alimentation, est un composant matériel chargé de fournir l'énergie électrique à un ordinateur. Son rôle principal est de convertir la tension du secteur en différentes tensions continues de faible intensité, compatibles avec les circuits électroniques de l'ordinateur.

En général, les blocs d'alimentation des ordinateurs sont de type alimentation à découpage (SMPS), offrant des avantages tels que la légèreté, un rendement élevé et une taille compacte. Toutefois, ce type d'alimentation génère beaucoup de parasites haute fréquence, atténués plus ou moins efficacement par des boîtiers métalliques ou métallisés agissant comme une cage de Faraday, ainsi que par des filtres d'entrée et de sortie.



Figure III.22 : Le Bloc D'alimentation

III.2.2.5. Fin de course

Un capteur de fin de course est un dispositif de contact, similaire à un interrupteur, pouvant être soit ouvert, soit fermé. Il est fréquemment utilisé pour détecter la position d'un élément mécanique dans divers systèmes, tels que :

- La position d'un vérin (en début ou en fin de course)
- La position d'une porte (ouverte ou fermée)
- La position d'un ascenseur (niveau d'étage)
- La position d'une barrière automatique (ouverte ou fermée)
- La position d'une manette de jeu (bouton appuyé ou direction indiquée)

Le capteur de fin de course fonctionne comme un bouton-poussoir activé par un mouvement mécanique. La détection s'effectue lorsqu'un objet extérieur entre en contact avec le levier ou le galet du capteur. [23]

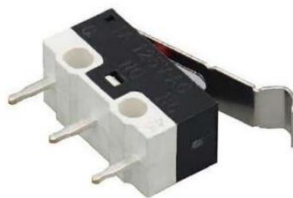


Figure III .23 : Contact Fin de Course .[23]

Ce dispositif peut adopter deux états distincts, également appelés états logiques :

- **Enfoncé** : En logique positive, l'interrupteur est fermé.
- **Relâché** : En logique positive, l'interrupteur est ouvert.

Les interrupteurs de position sont constitués de trois éléments de base :

- Une tête de commande avec son dispositif d'attaque (1) ;
- Un corps (2) ;
- Un contact électrique (3).

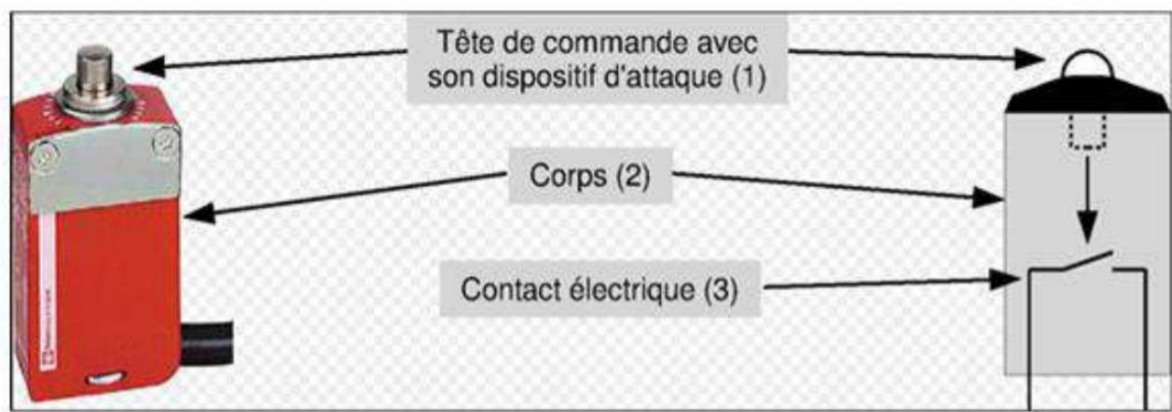


Figure III.24 : Element de contact fin de course.

La principale fonction d'un capteur de fin de course est d'arrêter un mouvement automatique commandé par un moteur électrique. Lorsque le contact est établi, une pression sur le bouton-poussoir stoppe immédiatement le mouvement.

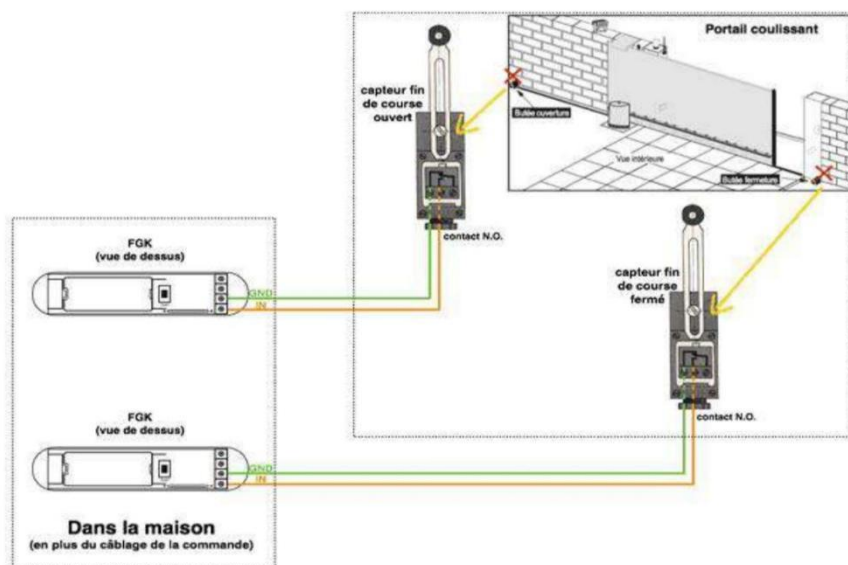


Figure III.25 : Exemple d'utilisation .

Le signal délivré par ce type de capteur est binaire, c'est-à-dire qu'il ne peut prendre que deux valeurs numériques :

- **0** : Non activé
- **1** : Activé

Ces capteurs, également appelés détecteurs de position « tout ou rien », sont largement utilisés dans diverses machines, notamment :

- Les robots
- Les machines-outils

- Les équipements d'assemblage

III.2.2.6. Bouton d'arrêt d'urgence

En automatisme, le bouton d'arrêt d'urgence est conçu pour couper instantanément l'alimentation des actionneurs, interrompant ainsi tous les processus en cours et informant l'automate de la situation.



Figure III.26 : Bouton d'arrêt d'urgence. [24]

En anglais, il est désigné par les termes suivants : emergency stop, e-stop, kill switch, ou panic button.

Le symbole électrique du bouton d'arrêt d'urgence est représenté par un champignon (un arc de cercle placé au-dessus d'une ligne droite) surmontant une tige. La partie inférieure de cette tige repose sur un triangle rectangle dont la pointe est dirigée à l'opposé du champignon. Des pointillés prolongeant la tige indiquent les lignes de commande de l'interrupteur.

Dans les documentations techniques, il est souvent identifié par les abréviations ARU (Arrêt d'Urgence) ou BAU (Bouton d'Arrêt d'Urgence).

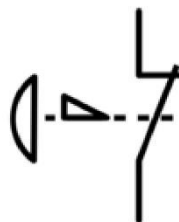


Figure III. 17 :symbole
AU

Figure III.27 : Symbole de BAU [24]

III.2.2.7. Le Relais électromagnétique :

Le relais est un dispositif électromécanique fondamental dans le monde de l'électronique et de l'automatisation. Sa fonction principale est de contrôler l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique par un signal de contrôle, souvent de faible puissance, qui déclenche un champ électromagnétique.

Cela permet de gérer des charges électriques beaucoup plus élevées sans interaction directe avec des composants à haute tension. Le relais constitue une

solution pratique et efficace pour automatiser les processus, protéger les circuits et assurer la sécurité dans des applications allant du résidentiel à l'industriel.

III.2.2.7.1. Fonctionnement d'un Relais :

Pour comprendre le fonctionnement du relais, il est utile d'imaginer un interrupteur manuel, avec la différence que le relais est actionné électriquement plutôt que manuellement. Le relais est principalement composé de trois composants clés : la bobine, l'ancre et les contacts.

1) La Bobine :

La bobine est constituée d'un fil de cuivre enroulé autour d'un noyau en fer. Lorsqu'un courant électrique traverse la bobine, un champ magnétique est généré. Ce champ magnétique est la force qui permet au relais de fonctionner, car il attire l'ancre mobile, provoquant le mouvement des contacts.

2) L'Ancre :

L'ancre est une partie mobile du relais, reliée aux contacts. Lorsqu'elle est attirée par le champ magnétique généré par la bobine, elle se déplace pour ouvrir ou fermer les contacts du circuit. L'ancre revient à la position de repos (quand il n'y a pas de courant dans la bobine) grâce à un ressort.

3) Les Contacts :

Les contacts sont les éléments conducteurs qui ouvrent ou ferment effectivement le circuit principal. Il existe différentes configurations de contacts, y compris les contacts normalement ouverts (NO) qui se ferment lorsque la bobine est sous tension et les contacts normalement fermés (NC) qui s'ouvrent quand la bobine est excitée. En outre, il existe des relais avec des contacts d'échange, qui agissent comme des déviateurs, en changeant la connexion d'un circuit à l'autre. [25]

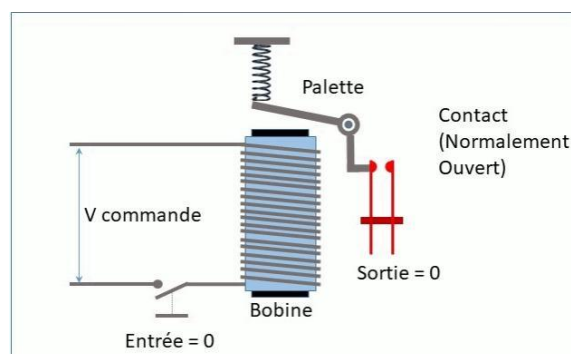


Figure III.28 : Les composants du Relais électromagnétique. [26]

III.2.2.8. La broche :

La broche de la machine est fixée sur le troisième axe, donc elle possède un mouvement vertical



Figure III.29 : La Broche

III.3. Eléments et caractéristiques de la partie commande

III.3.1. Circuit d'interface

III.3.1.1. Schéma globale de la partie électrique

Avant de procéder à la réalisation pratique, nous avons utilisé un logiciel de CAO nommé « EASYDEDA ». Il s'agit d'un outil de conception assistée par ordinateur dédié à l'électronique, qui permet à la fois de dessiner des schémas électroniques et de concevoir le circuit imprimé correspondant. Ce logiciel propose de nombreux outils organisés en modules au sein d'une interface unique. Ce schéma est composé de plusieurs éléments.

Les composants	La Quantité.	Le symbole
Carte Mach 3	01	
TMC 2208 V1.2	03	
Les condensateur	03	
Moteur Pas à pas	03	
Bouton d'arrêt d'urgence	01	

Capteur de fin de course	06	
--------------------------	----	---

Tableau 6 : Les composants du schéma électrique.

L'image ci-dessous illustre le circuit conçu avec EASYDEDA :

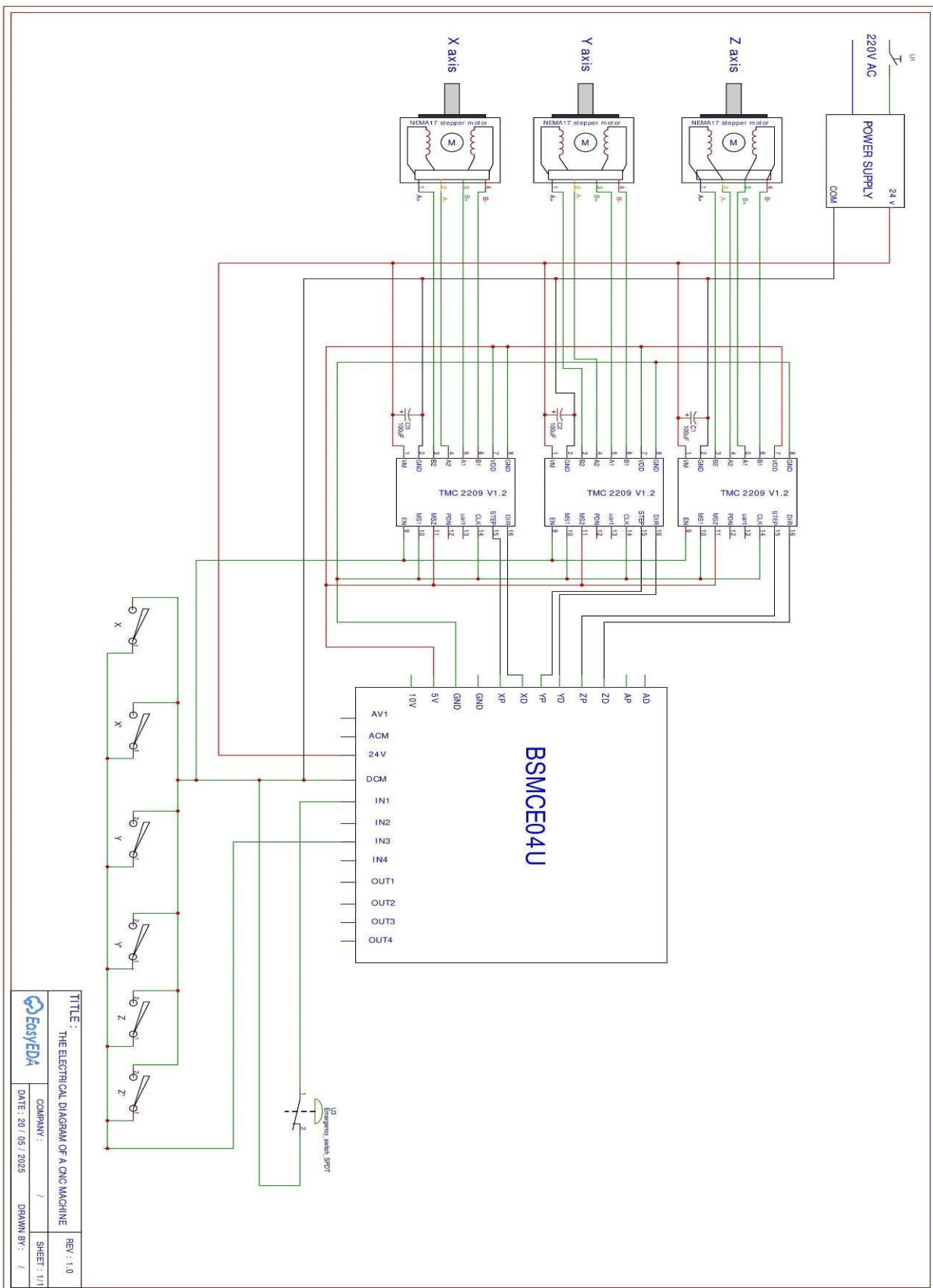


Figure III.30 : Le schéma Électrique.

III.4 Simulation Mécanique sous SOLIDWORKS de la machine CNC

III.4.1 Introduction

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) regroupe l'ensemble des logiciels et des méthodes de modélisation géométrique utilisés pour concevoir, simuler virtuellement à l'aide d'un ordinateur et de techniques numériques, puis réaliser des produits manufacturés ainsi que les outils nécessaires à leur fabrication.

Un logiciel de CAO se divise généralement en quatre modules principaux, organisés comme suit :

- **Le modeleur géométrique** : il joue le rôle de "planche à dessin". Cette partie contient les éléments géométriques de base tels que les points, lignes, cercles, ellipses, plans, sphères, cylindres, cônes, surfaces de révolution, surfaces de balayage, etc. Elle inclut aussi les éléments topologiques comme les sommets, faces, arêtes, orientations, coïncidences, adjacences, intersections, opérations de soustraction, d'union, etc.
- **L'outil de visualisation.**
- **Diverses applications** : elles permettent, entre autres, le calcul de grandeurs géométriques (distances, moments d'inertie, volumes, masses, etc.), ainsi que des fonctions spécifiques au métier telles que l'assemblage de composants, la création de plans, la simulation d'opérations d'usinage, de moulage, de fraisage, etc.
- **Un module de contrôle** : il assure la gestion et la coordination des interactions entre les trois modules précédents.

Description du logiciel « SOLIDWORKS »

Il s'agit d'un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur (CAO) en 3D, fonctionnant sous le système d'exploitation Windows. Développé par Dassault Systèmes, SOLIDWORKS est largement utilisé dans l'industrie pour la modélisation mécanique, grâce à son interface intuitive et ses puissantes fonctionnalités.

SOLIDWORKS est un modeleur 3D basé sur la conception paramétrique, ce qui permet aux concepteurs de définir des relations entre les différentes entités géométriques, facilitant ainsi les modifications ultérieures. Il produit trois types de fichiers correspondant à trois éléments fondamentaux : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont interconnectés, de sorte que toute modification apportée à l'un d'eux est automatiquement propagée aux autres fichiers concernés, garantissant ainsi la cohérence globale du projet tout au long du processus de conception.

Un dossier complet regroupant tous les fichiers liés à un même système constitue une maquette numérique. Cette approche intégrée permet de visualiser, analyser et valider le produit avant sa réalisation physique, réduisant ainsi les erreurs de conception et les coûts de développement.

De nombreux outils viennent enrichir l'environnement de travail de

SOLIDWORKS. Il s'agit à la fois d'utilitaires spécialisés selon les secteurs d'activité (comme la tôlerie, le bois, ou le BTP), et d'applications permettant la simulation mécanique (analyse statique, dynamique, thermique, etc.), la gestion de données techniques (PDM), la création d'images de synthèse photoréalistes ou encore la documentation technique. Toutes ces fonctions exploitent les données issues de la maquette virtuelle, assurant une traçabilité optimale des informations tout au long du cycle de vie du produit.

En somme, SOLIDWORKS se positionne comme une solution complète et modulaire pour la conception industrielle, alliant productivité, précision et flexibilité.

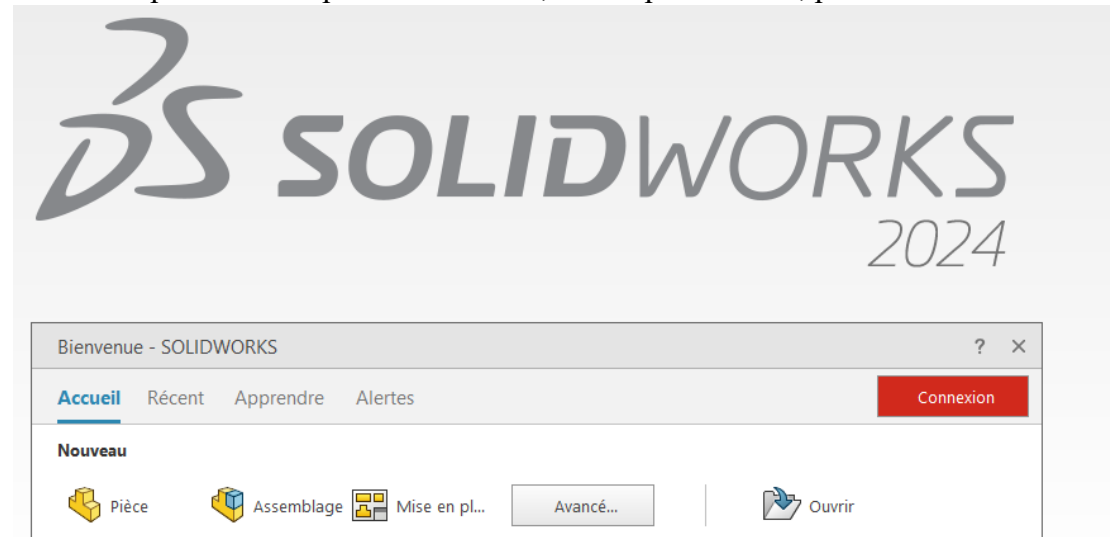


Figure III. 31 : INTERFACE DE SOLIDWORKS

III.4.3 Partie pièce

La conception des pièces de la machine, avec SolidWorks, se déroule en 3 étapes :

- Sélection du plan de face,
- Conception de la forme en 3D en utilisant l'option « bossage extrudé »
- Création des différents détails qui caractérisent chacune de pièces.

III.4.3.1. Rail de guidage

Nous avons défini la même base pour tous les rails mais avec des longueurs différentes.

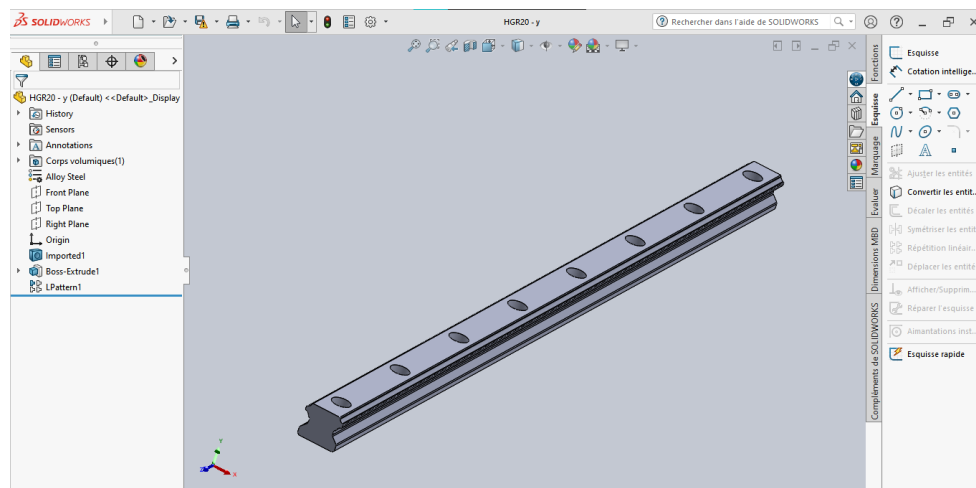


Figure III.32 : RAIL

III.4.3.2. Les bases des axes

Nous avons défini la longueur de l'axe, nous avons obtenu la forme finale en 3D. Pour faciliter l'assemblage de la pièce avec le support, nous avons minimisé les extrémités de l'axe.

➤ Base Y

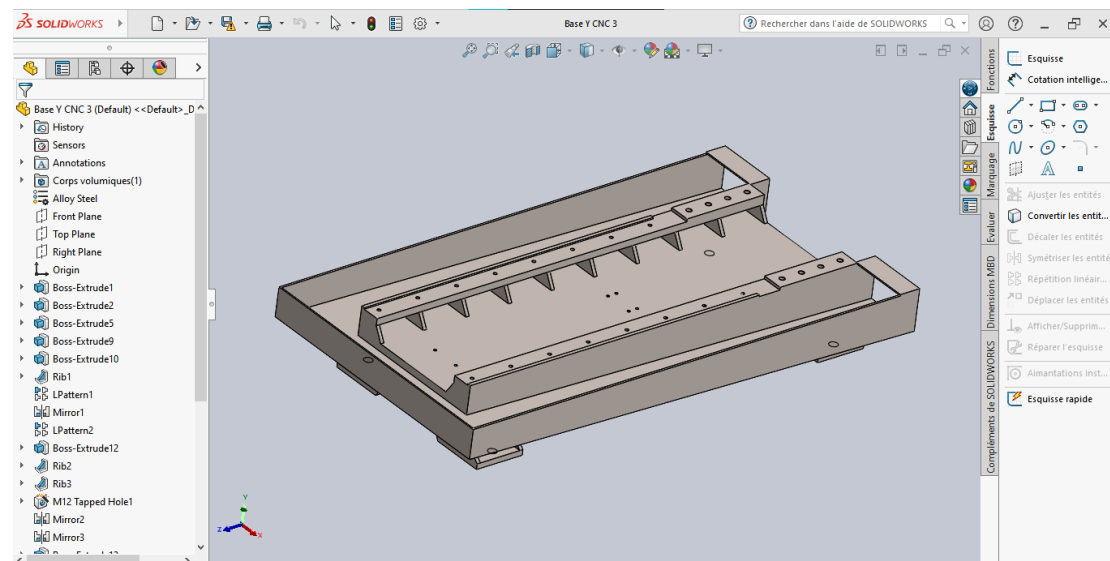


Figure III. 33 : Base de L'axe Y

➤ Base X

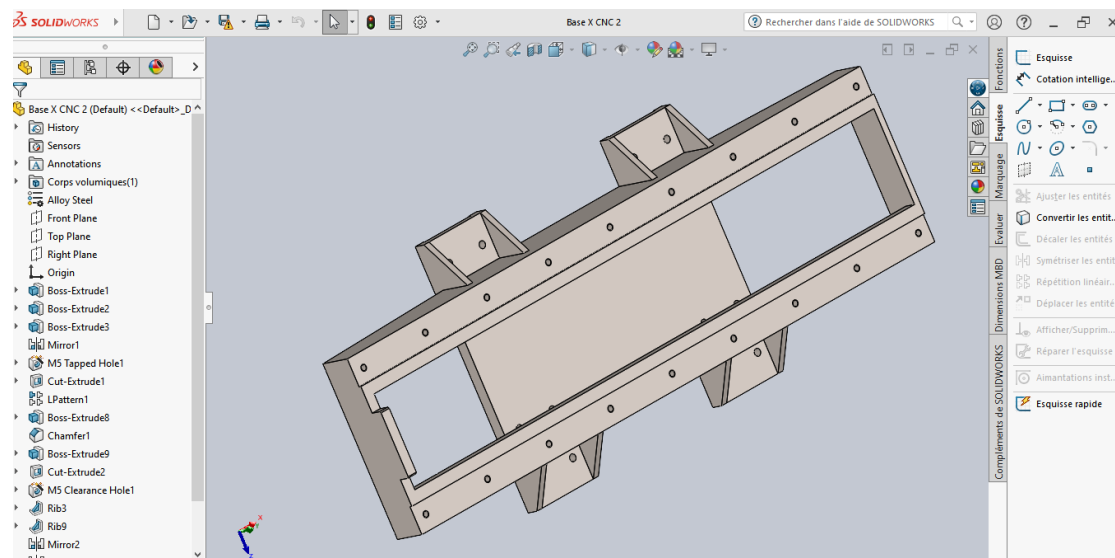


Figure III. 34 : Base de L'axe X

➤ Base Z

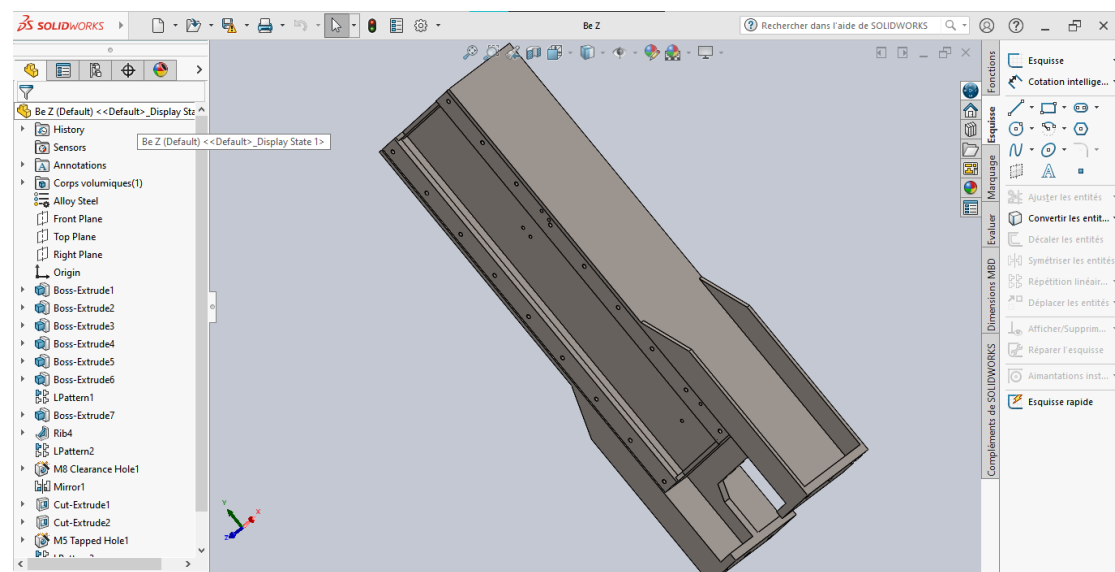


Figure III. 35 : Base de L'axe Z

III.4.3.3. Les supports

Le support contient une entrée pour l'axe, des trous pour fixer sur le rail et le moteur et un canal pour limiter le mouvement des axes.

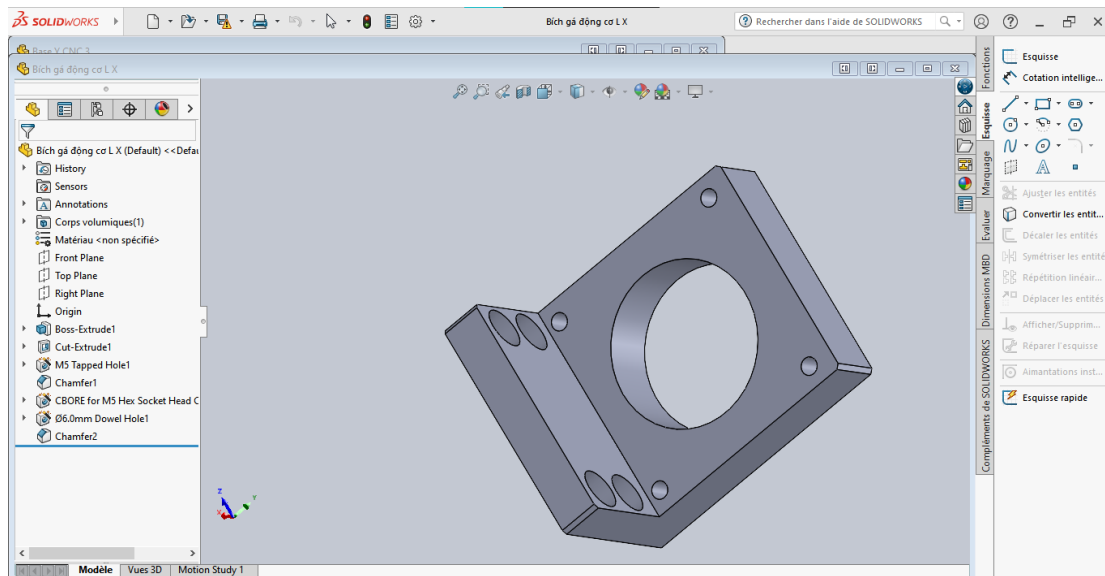


Figure III. 36: Support axe X à cotée de moteur

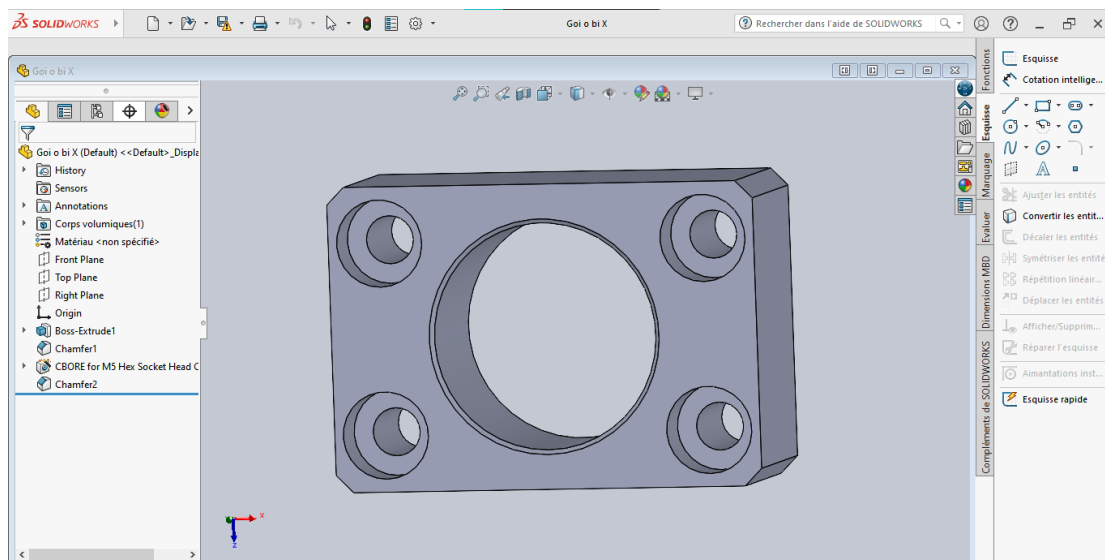


Figure III. 37 : Support axe X à cotée roulement

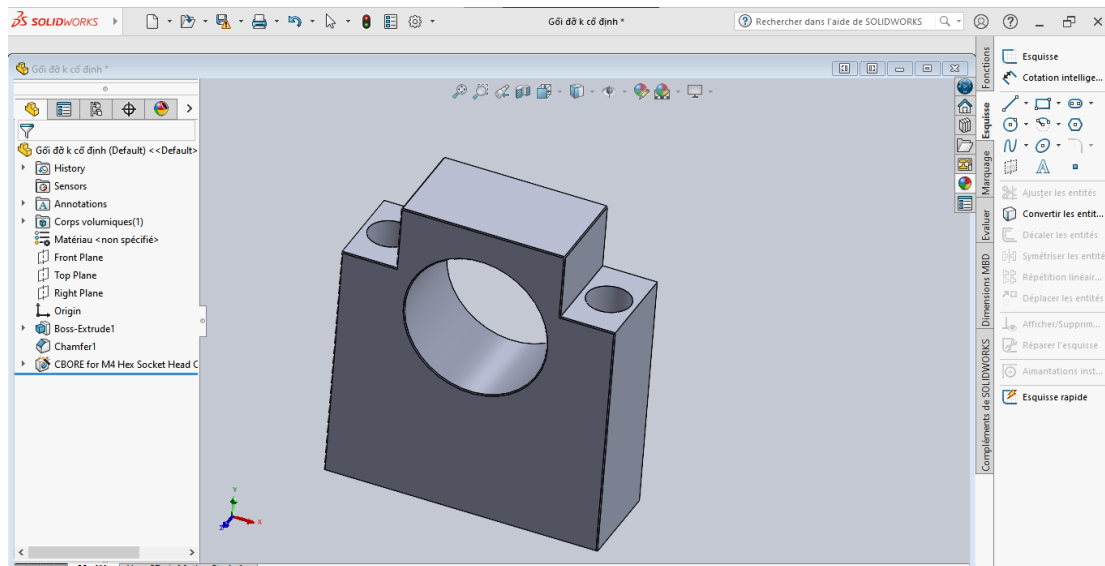


Figure III. 38 : Support axe Y ET Z à cotée roulement

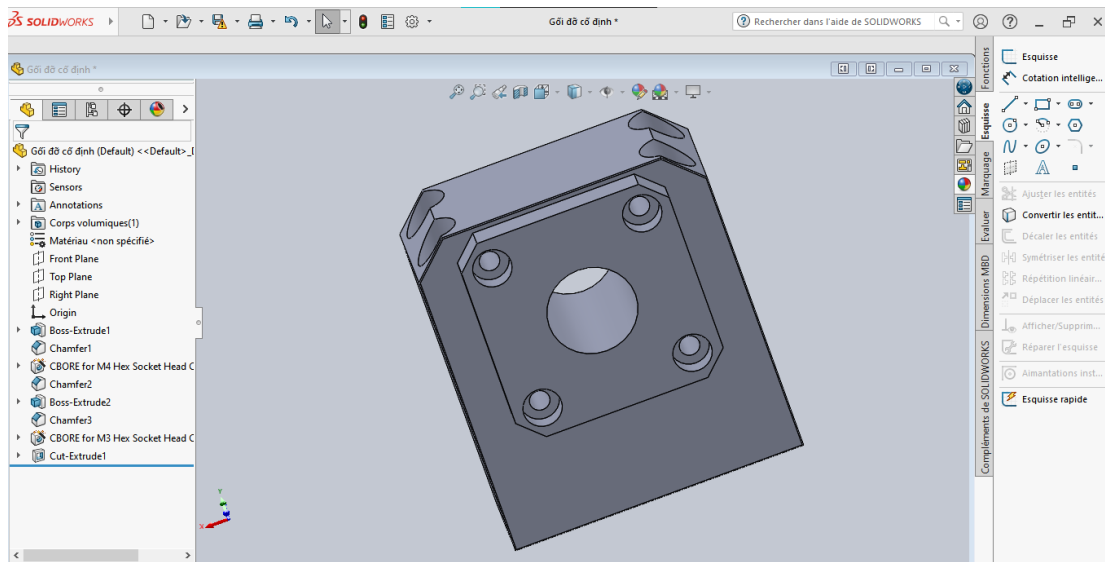


Figure III. 39 : Support axe X,Y et Z à cotée de moteur

III.4.3.4. Moteur pas à pas

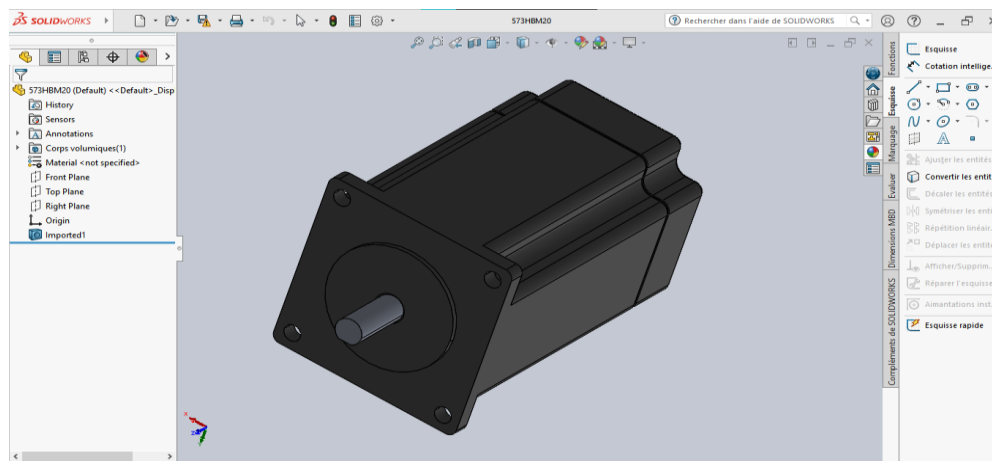


Figure III. 40 : Moteur pas a pas

III.4.3.5. Accouplement :

Cette pièce cylindrique assure une liaison entre le moteur et la vis sans fin-écrou, ceci permet la transmission de rotation.

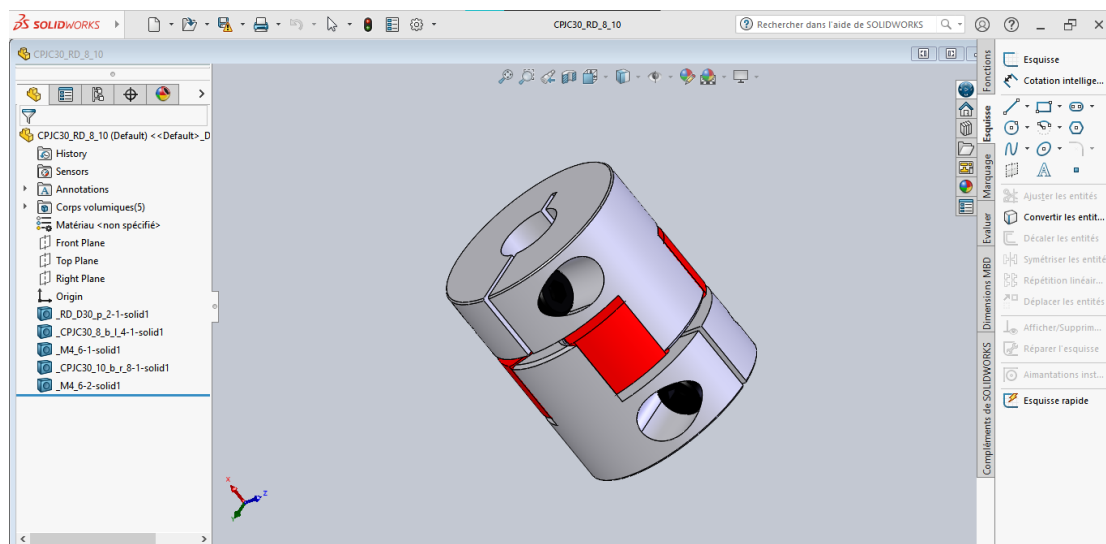


Figure III. 41 : accouplement

III.4.3.6. Vis fîlée (tige) :

Cette vis est dessinée selon les caractéristiques présentées dans le tableau suivant :

Type	Trapézoïdale (mm)
Nbre de filet	4
Diamètre de vis	2
Pas	10
Longueur	320

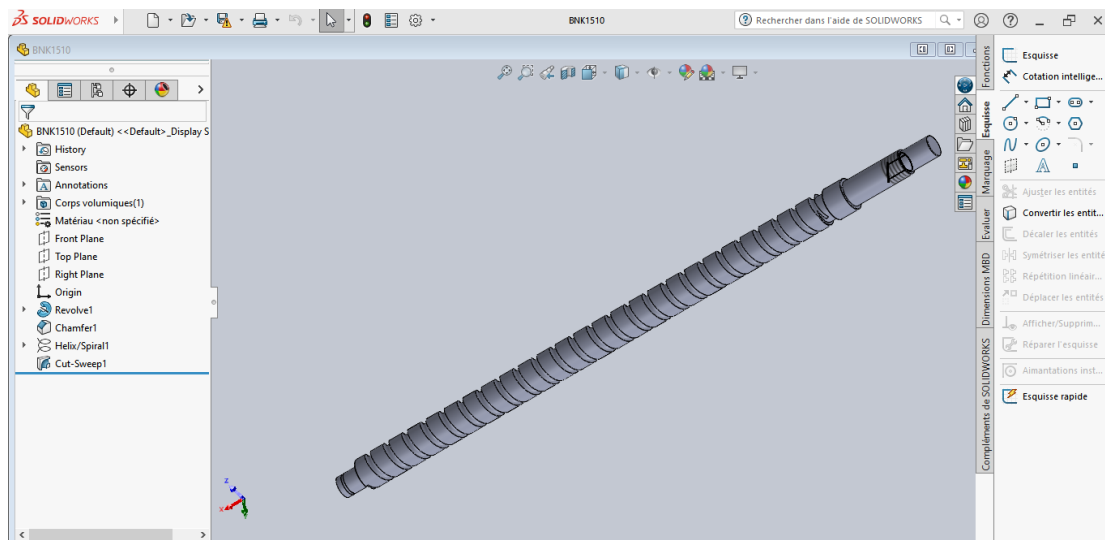


Figure III. 42 : Tige filetée

III.4.3.7. Écrou

Conception de l'écrou a placé sur la vis sans fin. Deux écrous conçus un pour l'axe X et l'autre pour l'axe Y, Z.

Pour l'objectif de transformée la rotation de tige en mouvement

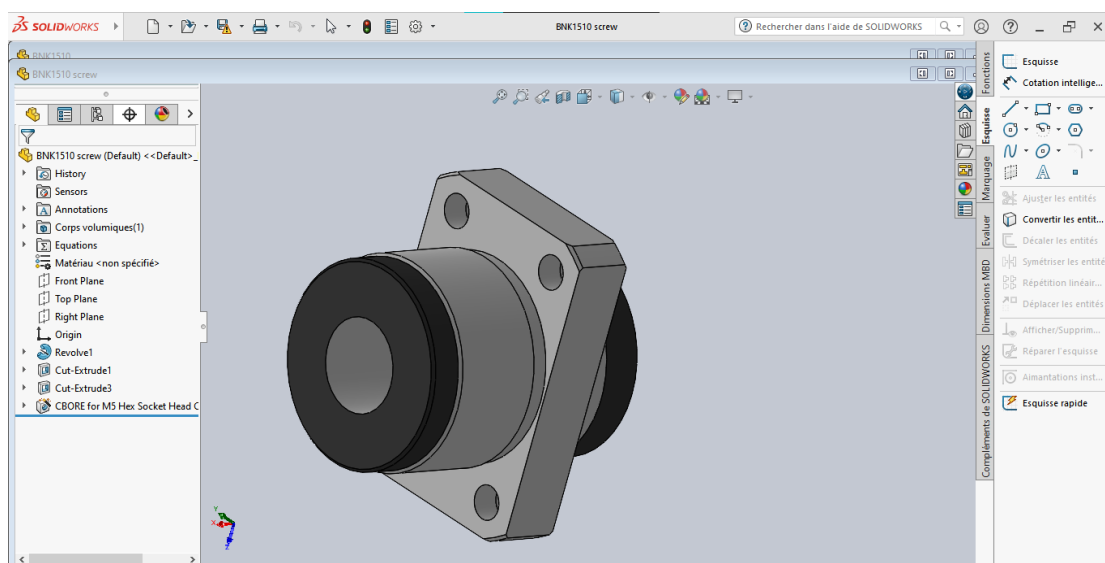


Figure III. 43 : Ecrou

III.4.3.8. Support de vis sur l'axe Y et Z

Cette pièce assemblée avec l'écrou

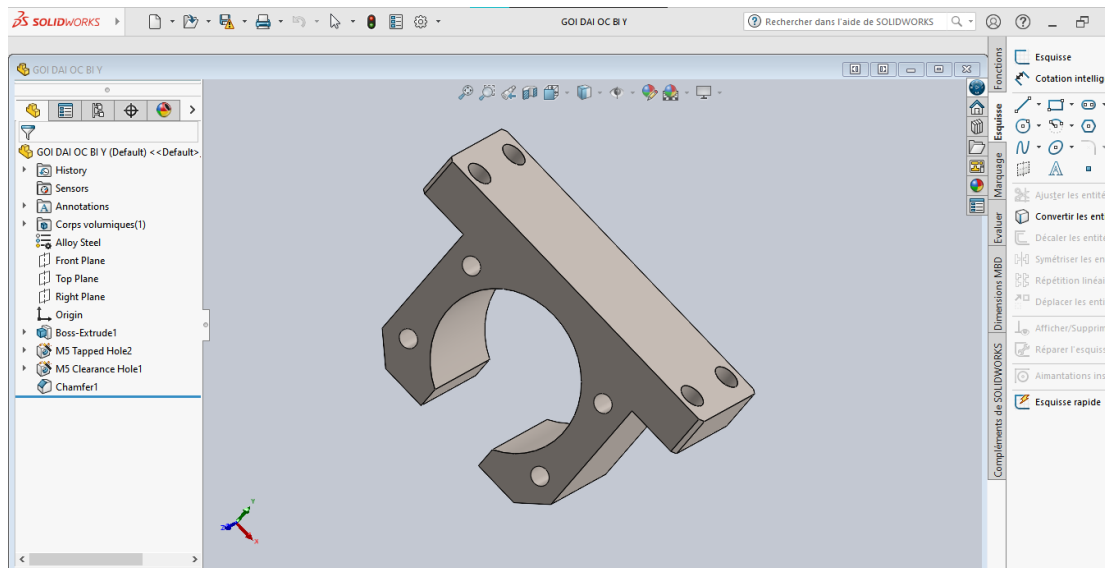


Figure III. 44 : support de vis axe Y et Z

III.4.3.9. Support de vis sur l'axe X

Nous avons créé ce support que pour l'axe X a cause de la charge

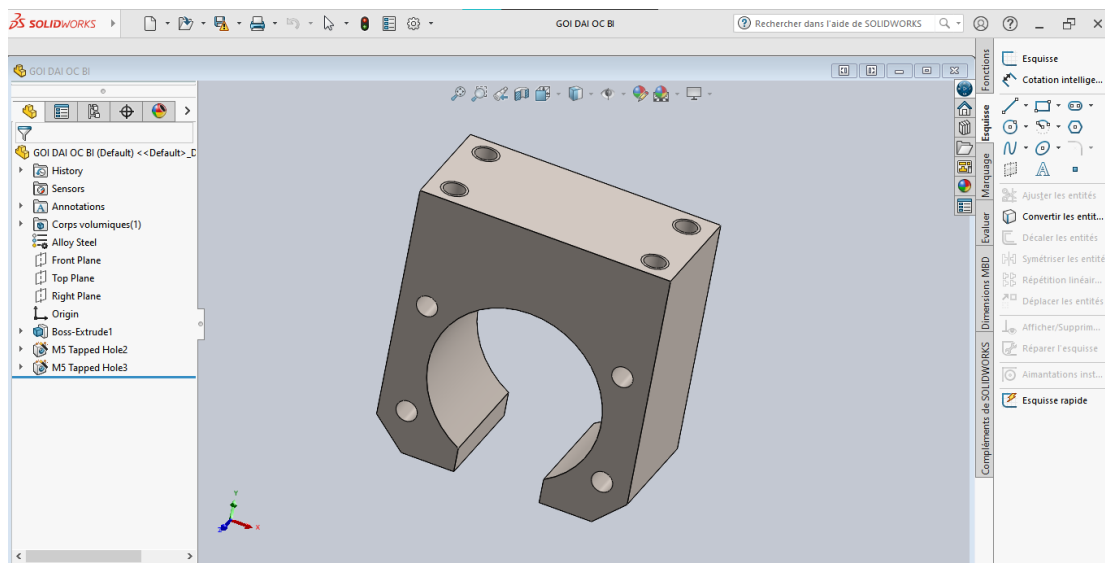


Figure III. 45 : support de vis axe X

III.4.3.10. Support outil

Composé de deux pièces les deux sont fixées sur les glissières

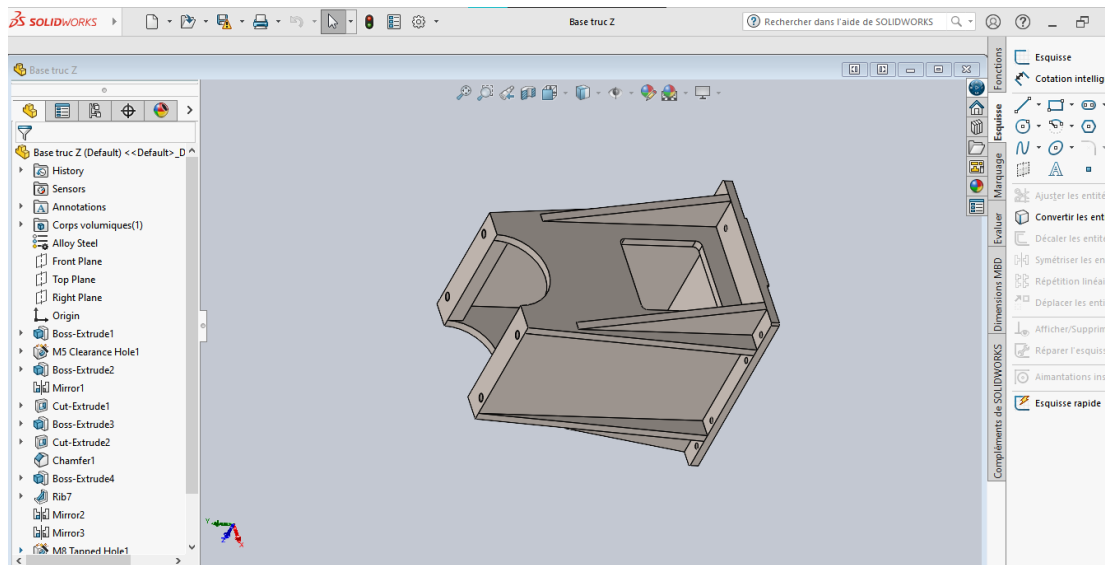


Figure III. 46 : support d'outil

III.4.4. Partie de l'assemblage

III.4.4.1. Le cadre de CNC

L'assemblage du cadre est constitué de deux base (X,Z) , reliés entre eux.

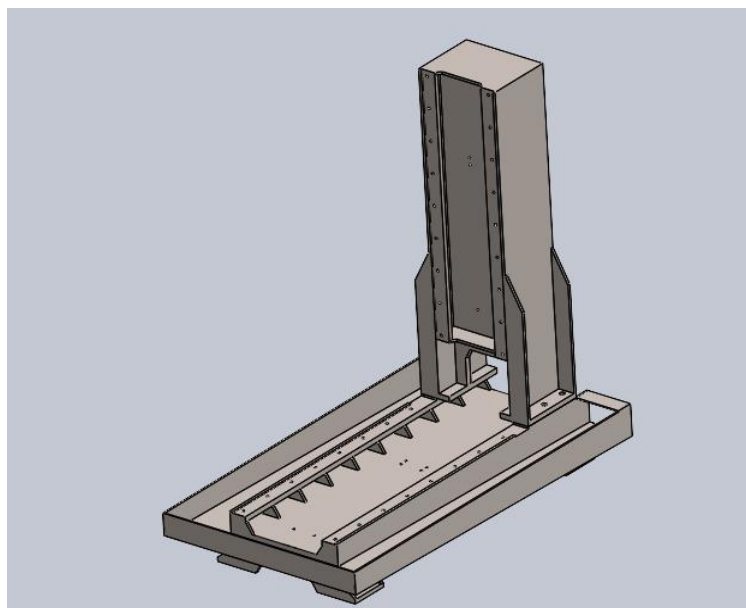


Figure III. 47 : Cadre de la machine

III.4.4.2. L'assemblage sur l'axe Y :

Consiste des rails , glissières , des supports, moteur pas à pas avec une tige fileté

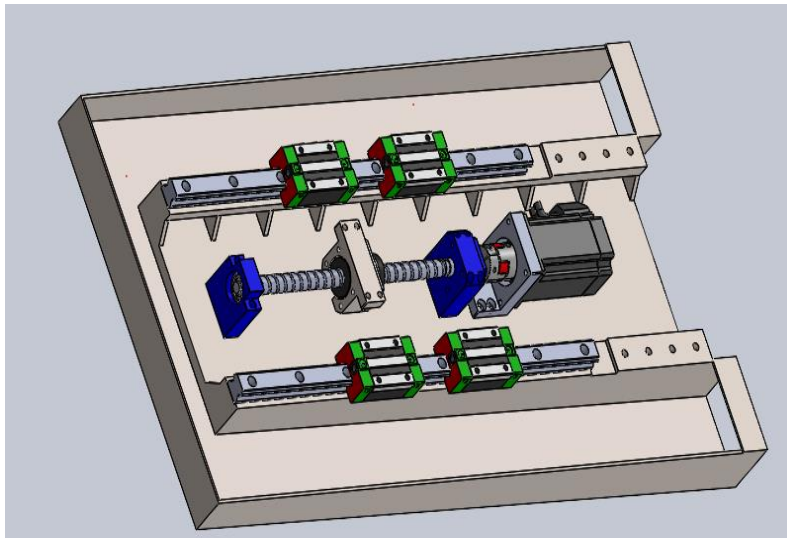


Figure III. 48 : Assemblage sur l'axe Y.

III.4.4.3. L'assemblage sur l'axe X

Nous procédons comme suit :

- Les supports de l'axe X
- Les tiges
- Les glissières
- Le moteur et la tige fileté
- Un roulement

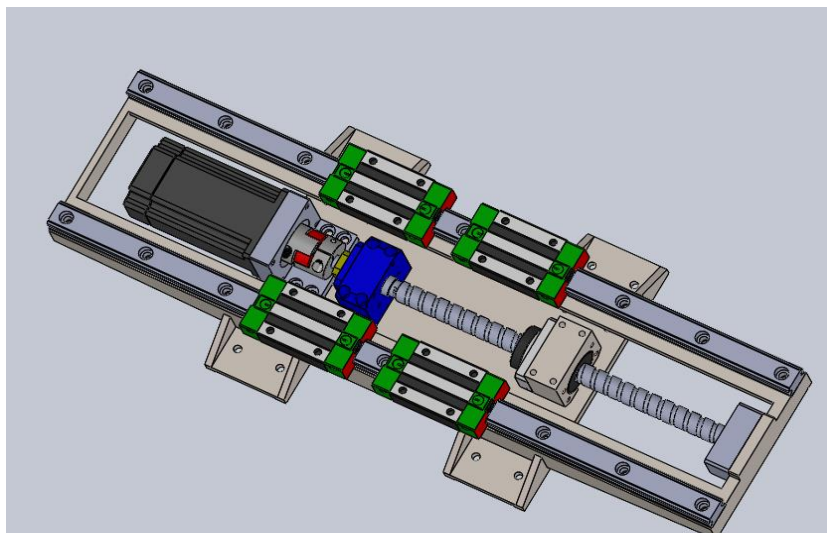


Figure III. 49 : Assemblage sur l'axe X

III.4.4.4. L'assemblage sur l'axe Z

Consiste des rails , glissières , des supports, moteur pas à pas avec une tige filetée

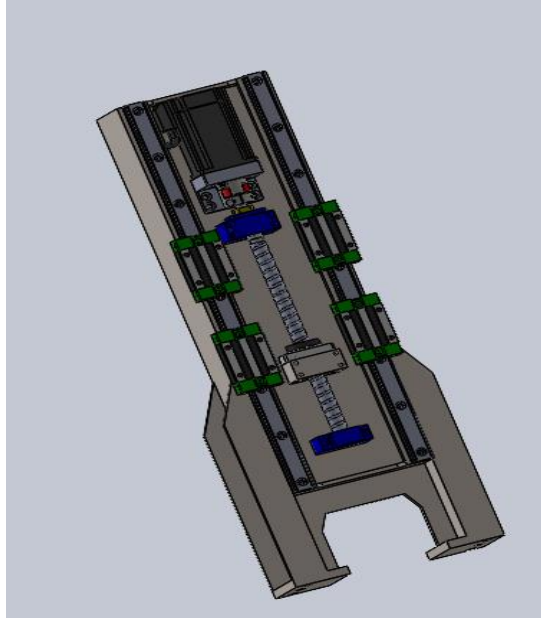


Figure III. 50 : Assemblage sur l'axe Z

III.4.4.5. L'assemblage final du CNC

Ici nous avons assemblée tout les axes et finalisé la simulation

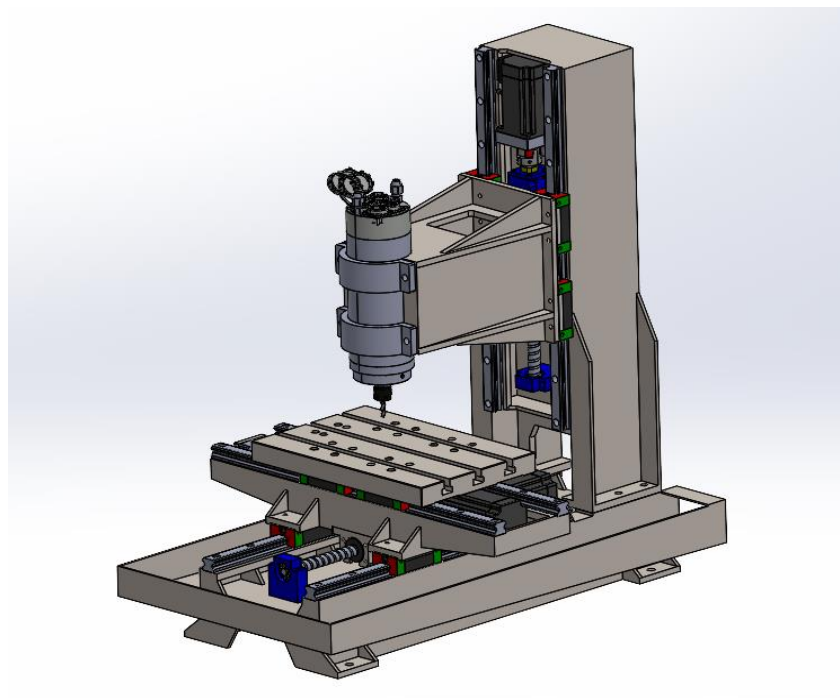


Figure III. 51 : L'assemblage final

III.5. La réalisation de la machine CNC :

Lors de la fabrication de notre machine CNC, nous avons rencontré plusieurs défis, principalement liés à la disponibilité et au coût des composants électriques et mécaniques.

Par exemple, nous avons initialement prévu d'utiliser le pilote de moteur pas à pas TMC2209 v1.2 en raison de ses fonctionnalités avancées. Cependant, celui-ci n'était pas disponible sur le marché local, nous avons donc opté pour le TB6600. Bien que le TB6600 soit technologiquement moins avancé que le TMC2209, les deux pilotes offrent de bonnes performances en matière de réduction du bruit et des vibrations surtout comparés à des alternatives comme le DRV8825 et l'A4988.

Le principal défi que nous avons rencontré concernait le coût élevé des composants mécaniques. Pour y faire face, nous avons effectué plusieurs substitutions stratégiques. Par exemple, nous avons remplacé le système de rails utilisé dans la simulation par un modèle plus abordable offrant des performances comparables. De plus, au lieu d'utiliser des vis à billes, nous avons choisi des vis trapézoïdales (tiges filetées de type Acme), qui offrent un bon compromis entre performance et coût.

Certaines de nos décisions peuvent sembler peu conventionnelles, sauf si elles sont envisagées d'un point de vue financier. Dans plusieurs cas, nous avons constaté qu'un système de rails de 0,5 mètre avec double bloc de guidage linéaire ouvert coûtait presque autant qu'un système de 1 mètre. De même, l'écart de prix entre les vis à billes de 0,5 mètre et celles de 1 mètre n'était que d'environ 20 %. En tenant compte de ces éléments, nous avons décidé d'acheter des rails et des vis à billes de 1 mètre afin de maximiser la valeur à long terme et de permettre une réutilisation éventuelle dans de futurs projets.

Le tableau ci-dessous résume les principaux composants utilisés dans notre machine CNC, ainsi que leurs quantités et dimensions :

Le composant	La photo du composant	Nombre de composants × dimensions × Prix	Total
Rail TBR16		4 × 1m × 5900	20800
Tige filetée trapézoïdale 8 mm Acme (vis mère)		1 × 2m × 4200 1 × 80 cm × 2300	6500

Bloc de glissière à billes pour mouvement linéaire 16 mm		4 × 950	3800
Accouplement flexible en aluminium pour moteur pas à pas 8 × 5 × 25 mm		3×400	1200
Arbre rond vertical linéaire (axe) 16 mm		1 × 2m × 4900	4900
Support de guidage pour arbre linéaire SK16 (16 mm)		4 × 400 (Malheureusement on a trouvé SK12 (12 mm)	1600

Roulement à billes avec palier monté (pillow block) 8 mm		6×450	2700
Support pour écrou T8 (bloc de conversion, boîtier d'écrou)		3×800	2400
Écrou en laiton T8 pour tige filetée Acme 8 mm		3 Chaque tige filetée a une écrou Donc on a acheté une écrou 1×300	300

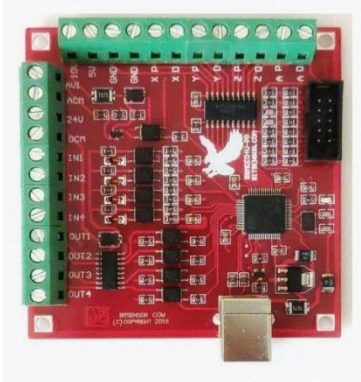
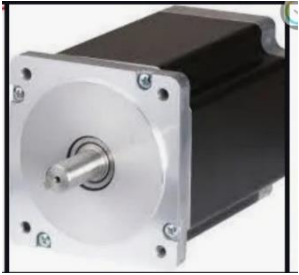
Bloc palier linéaire ouvert SBR16UU pour mouvement linéaire		8	/
Les boulons et des vis		/	1500
Le bois et le travail de menuiserie		/	6600

Tableau 7 : Les composants mécaniques .

$$6600+1500+300+2400+2700+1600+4900+1200+3800+20800+6500=$$

52300

Le Composant	La photo du composant	Nombre de composants $\times$ Prix	Total
Pilote de moteur pas à pas TB6600		3 $\times$ 3200	9600

<p>Interrupteur de fin de course 250 VAC 5A</p>		<p>6×70</p>	<p>420</p>
<p>Bouton d'arrêt d'urgence NC</p>		<p>1×450</p>	<p>450</p>
<p>la Carte de contrôle de mouvement USB Mach3 BSMCEO4U V2.2</p>		<p>1×4300</p>	<p>4300</p>
<p>Alimentation. 12 V 20 A</p>		<p>1×2400</p>	<p>2400</p>
<p>Moteur pas à pas 1.75 A 0.75 N.m</p>		<p>3×3900</p>	<p>11700</p>

Relais Optocopieur 12 VDC		1×350	350
Les fils électriques		/	2000
Répartiteur		1×920	920
Autre choses	/	/	2000

Tableau 7 : Les composants électriques .

Ce tableau présente les avantages et les inconvénients de chaque composant de la machine CNC que nous avons modifié au cours du processus de Réalisation :

Catégorie	Option	Avantages	Inconvénients
Rails de guidage	Rails ronds	<ul style="list-style-type: none"> - Coût plus bas -Alignement plus facile - Adaptés aux charges légères à moyennes 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins rigides - Peuvent fléchir sous la charge - Moins précis
	Rails carrés	<ul style="list-style-type: none"> - Haute rigidité - Meilleure précision -Supporte des charges plus élevées -Moins de déformation 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus coûteux -Alignement plus difficile
Pilotes de moteur	TMC2209	<ul style="list-style-type: none"> -Très silencieux (stealthChop) - Faibles vibrations -Micro-pas élevés (jusqu'à 1/256) -Faible consommation -Diagnostic intégré avec contrôle UART - Prix abordable 	<ul style="list-style-type: none"> - Courant limité (~2 A) -Besoin d'un bon refroidissement en forte charge -Configuration légèrement plus complexe
	TB6600	<ul style="list-style-type: none"> - Supporte un courant élevé (jusqu'à 4 A) - Robuste et durable - Simple à câbler et à configurer 	<ul style="list-style-type: none"> - Bruyant - Résolution de micro-pas plus faible -Technologie plus ancienne -Environ deux fois plus cher que TMC2209
Vis de transmission	Vis trapézoïdale (ACME)	<ul style="list-style-type: none"> - Peu coûteuse -Auto-bloquante 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus de friction -Jeu important

		(évite les retours en arrière) - Facile à usiner	(backlash) - Moins efficace (40–70 %) -Peut générer du bruit et des vibrations sous charge ou en mouvement
	Vis à billes	- Très efficace (jusqu'à 90 %) - Faible jeu -Mouvement fluide et précis	- Coûteuse -Peut revenir en arrière sous charge -Nécessite lubrification et tolérances précises

Tableau 8 : tableau comparatif.

III.6.La réalisation de la machine CNC

III.6.1. Axe d'une CNC

Un degré de liberté d'un organe de machine est appelé AXE si l'actionneur du mouvement est asservi en vitesse et position, et s'il peut être synchronisé avec un autre degré de liberté pour obtenir un déplacement qui n'est pas parallèle à une direction principale du système de coordonnées.

Il permet d'obtenir une position, par une instruction numérique, à la résolution du moyen de mesure près.

Un axe est constitué de la façon suivante :

- Un chariot mobile sur glissières.
- Un système de transmission vis-écrou (vis à billes).
- Un moteur pas à pas.

III.6.2. La réalisation de l'axe X:

Fixation des différentes pièces de la partie fonctionnant sur l'axe X



Figure III. 52: réalisation de l'axe X

III.6.3. La réalisation de l'axe Y:

Fixation des différentes pièces de la partie fonctionnant sur l'axe Y



Figure III. 53: réalisation de l'axe Y

III.6.4. La réalisation de l'axe Z:

Fixation des différentes pièces de la partie fonctionnant sur l'axe Z



Figure III. 54: réalisation de l'axe Z

III.6.5. La réalisation de l'axe X, Y :

Fixation des différentes pièces de la partie fonctionnant (les moteurs, coupleurs, tige filetée, écrou, paliers, axe de guidage et les supports) sur l'axe X et fixation de l'axe Y et ses composants.



Figure III. 55: réalisation de l'axe X,Y

La réalisation Finale de la machine :

L'étape finale de la fabrication d'une machine CNC consiste à assembler les parties mécaniques des axes X, Y et Z. Cette étape est essentielle pour garantir la solidité et la précision de la machine.



Figure III. 56: La machine CNC.

Finition de la Partie Électrique d'une Machine CNC :

Une fois tous les composants mécaniques assemblés, la dernière étape de la partie électrique consiste à finaliser les connexions entre l'alimentation, les drivers de moteurs pas à pas et le contrôleur.

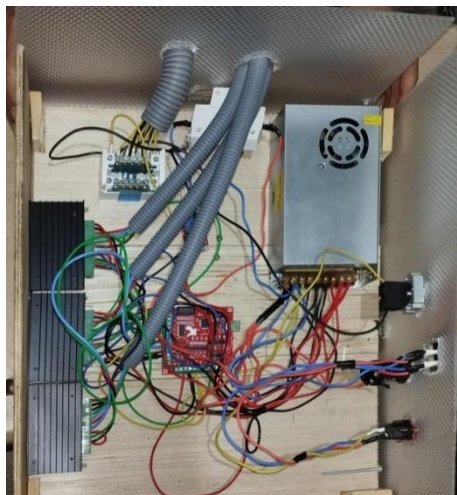


Figure III.57 : La réalisation de schéma électrique .

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les composants mécaniques et électriques indispensables à la conception de notre machine CNC. Les éléments mécaniques tels que les glissières, les rails, les paliers, les accouplements et la tige filetée ont été étudiés pour leur rôle essentiel dans la précision et la stabilité du mouvement. Sur le plan électrique, nous avons abordé les différents types de pilotes de moteurs pas à pas, ainsi que la méthodologie adoptée pour le choix des moteurs en fonction des exigences de la charge. L'intégration des capteurs de fin de course et du bouton d'arrêt d'urgence a également été examinée afin de garantir la sécurité et le bon fonctionnement du système. Enfin, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la machine CNC à l'aide du logiciel SOLIDWORKS, permettant ainsi une visualisation concrète de l'assemblage et une validation préliminaire de notre conception. Par ailleurs, on fait la réalisation de la machine CNC et nous avons illustré les différentes étapes de ce processus à travers des photos, afin de mieux représenter l'évolution pratique du projet.

Conclusion Générale :

Ce projet de fin d'études a été consacré à la conception, à la modélisation, et à la fabrication d'un prototype fonctionnel de machine à commande numérique (CNC) à trois axes. Il repose sur l'utilisation du langage de programmation G-Code ainsi que du logiciel de commande Mach3 avec sa carte dédiée. Cette machine est capable de calculer et d'exécuter les coordonnées de points correspondant à des trajectoires définies avec précision.

Les principales étapes de réalisation ont été les suivantes :

- Une présentation générale du fonctionnement et de la structure d'une machine CNC .
- Une étude des systèmes de commande, incluant les moteurs pas à pas, la configuration de la carte Mach3, le langage G-Code, et l'interface du logiciel de contrôle .
- L'identification et le choix des composants mécaniques et électriques nécessaires .
- La modélisation des pièces sous SolidWorks et l'assemblage complet de la machine .
- La mise en service suivie de tests d'usinage simples sur trois axes.

Notre objectif était non seulement de maîtriser la conception d'une CNC, mais aussi de proposer une approche plus accessible, économique et facile à entretenir, permettant à toute personne intéressée de construire et développer ses propres composants mécaniques.

L'analyse du budget montre que les composants mécaniques représentent environ 60 % du coût total, malgré notre choix de pièces de gamme moyenne. Cette part élevée s'explique par la nécessité de composants robustes capables de supporter les forces importantes et les vibrations intenses pendant l'usinage. Si nous devons améliorer un seul aspect dans le futur, ce serait sans doute la structure mécanique, tout en conservant le système de rails actuel, qui a démontré de bonnes performances à un coût raisonnable.

Les composants électriques représentent les 40 % restants. L'un des postes les plus coûteux est la broche. Les moteurs synchrones et à courant continu associés à des variateurs sont performants mais chers. Une solution plus économique consiste à utiliser un moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence et un système d'engrenage, permettant d'atteindre des vitesses élevées tout en réduisant les coûts — sans perdre la capacité d'usinage qu'offrent les moteurs DC.

Nous avons également appris qu'un design trop complexe peut entraîner des risques supplémentaires de panne, une maintenance difficile, et une augmentation des coûts. Il est donc essentiel de trouver un équilibre entre performance, simplicité,

robustesse et prix.

Dans une optique de simplicité et de maintenance, nous avons volontairement conservé les moteurs pas à pas. Ils sont plus abordables que les servomoteurs et plus faciles à diagnostiquer en cas de panne. Pour compenser leur manque de couple ou de précision, nous avons intégré un système de réduction mécanique : par exemple, une réduction 1 :2 double la précision mais divise la vitesse par deux. Cela permet un bon compromis entre précision et coût.

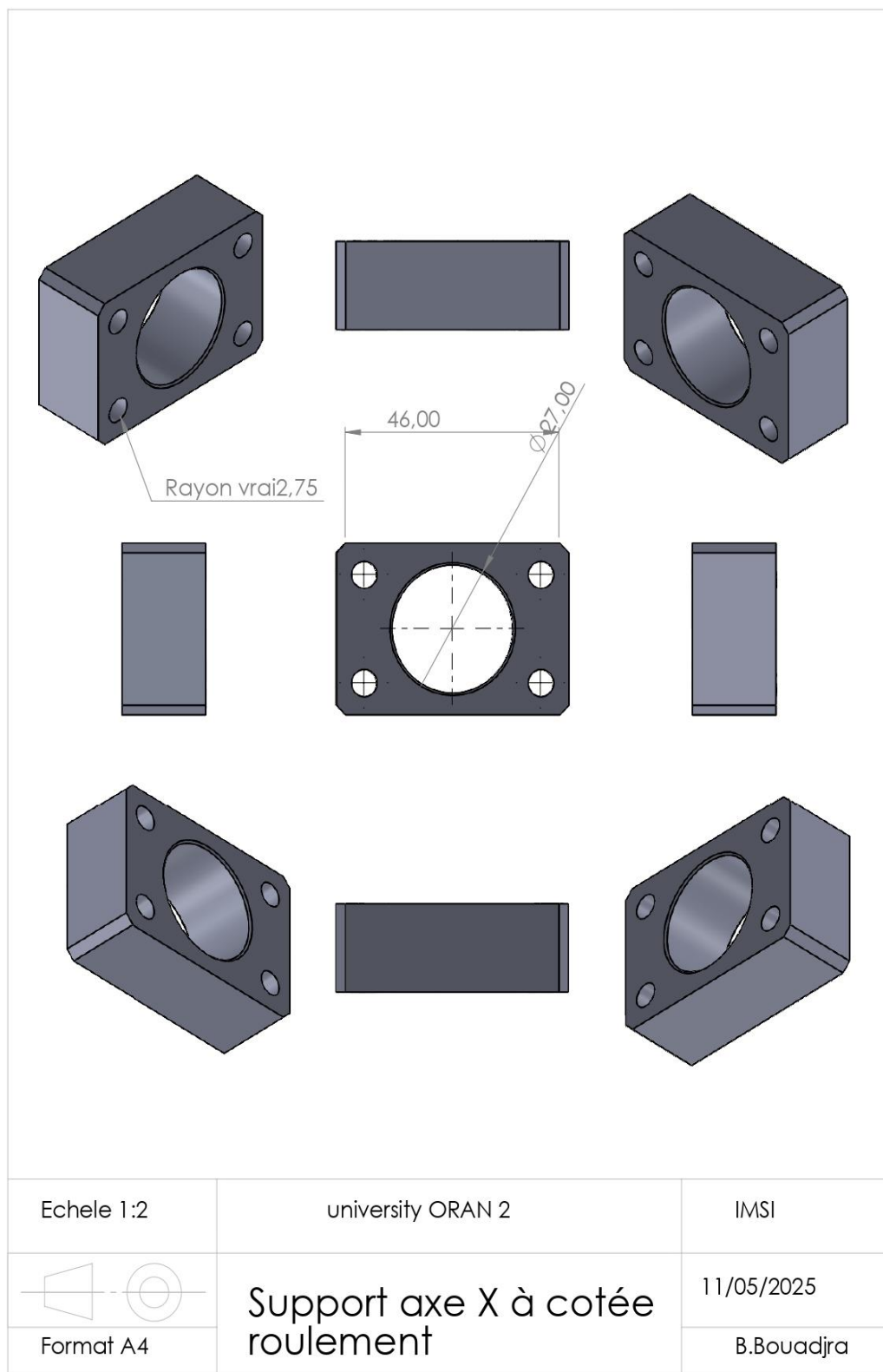
À ce stade, notre prototype représente une preuve de concept solide, démontrant la faisabilité de notre approche. Toutefois, le développement d'un système plus abouti, robuste et industrialisable nécessitera encore 2 à 3 années de travail et d'optimisation.

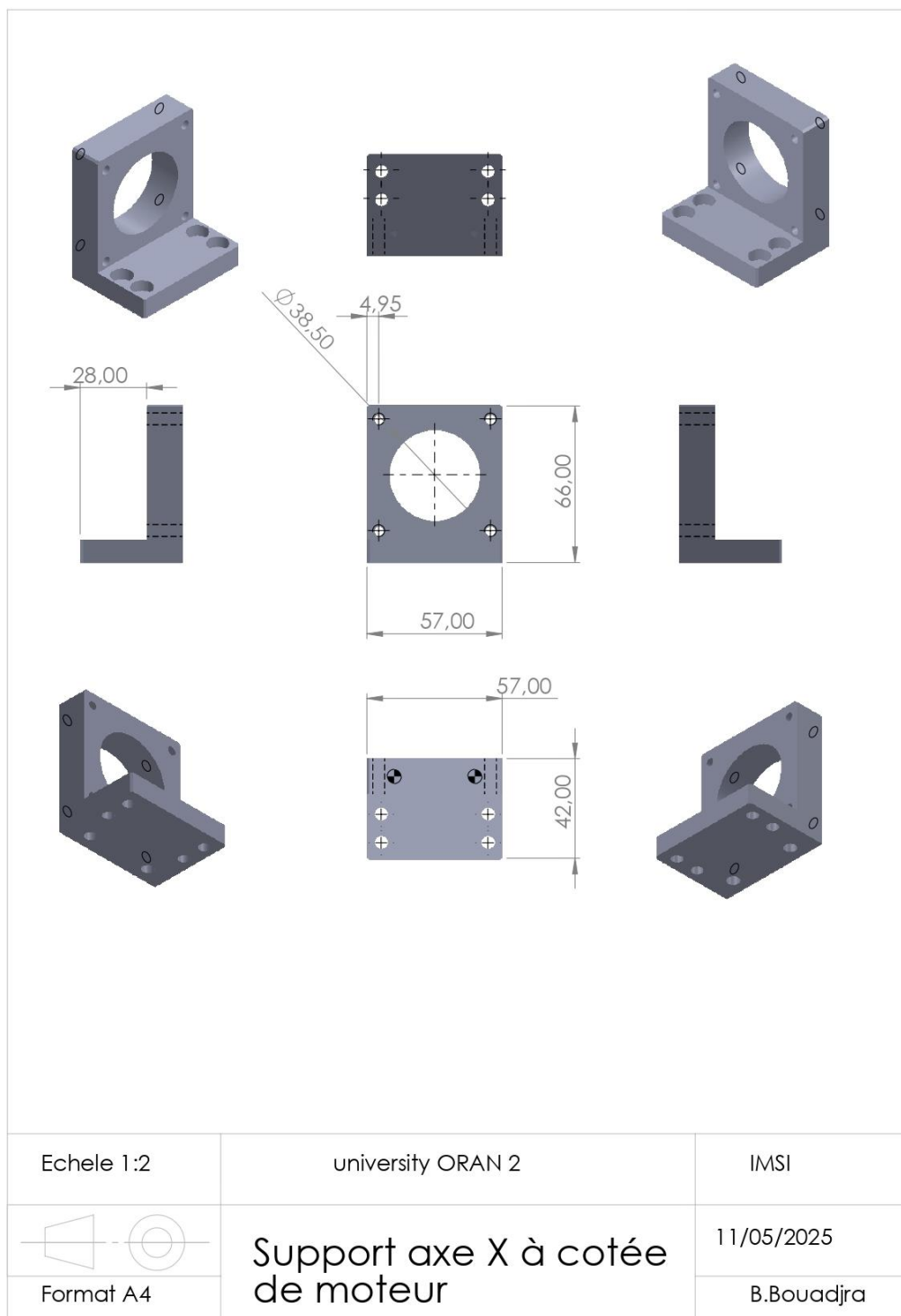
Nos perspectives pour les futures versions incluent :

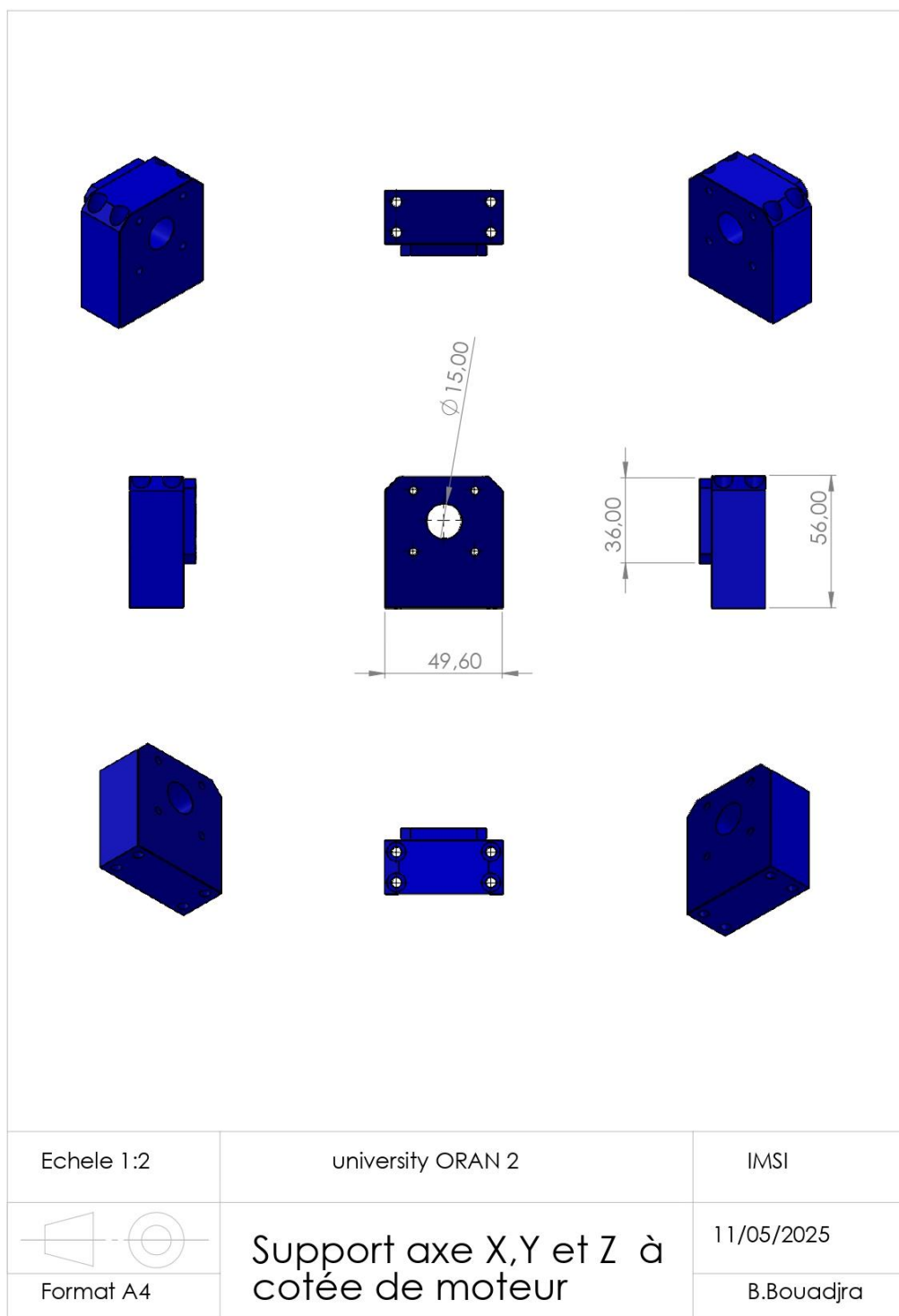
- Le renforcement de la structure mécanique pour mieux absorber les vibrations .
- L'amélioration de la rigidité et de la précision .
- L'optimisation du choix de la broche, pour un meilleur compromis entre coût et performance .
- L'intégration d'une interface utilisateur plus intuitive et accessible .
- Le développement d'un logiciel de configuration simplifié pour les utilisateurs débutants .
- Et enfin, la réduction globale du coût de fabrication sans compromettre les fonctionnalités essentielles.

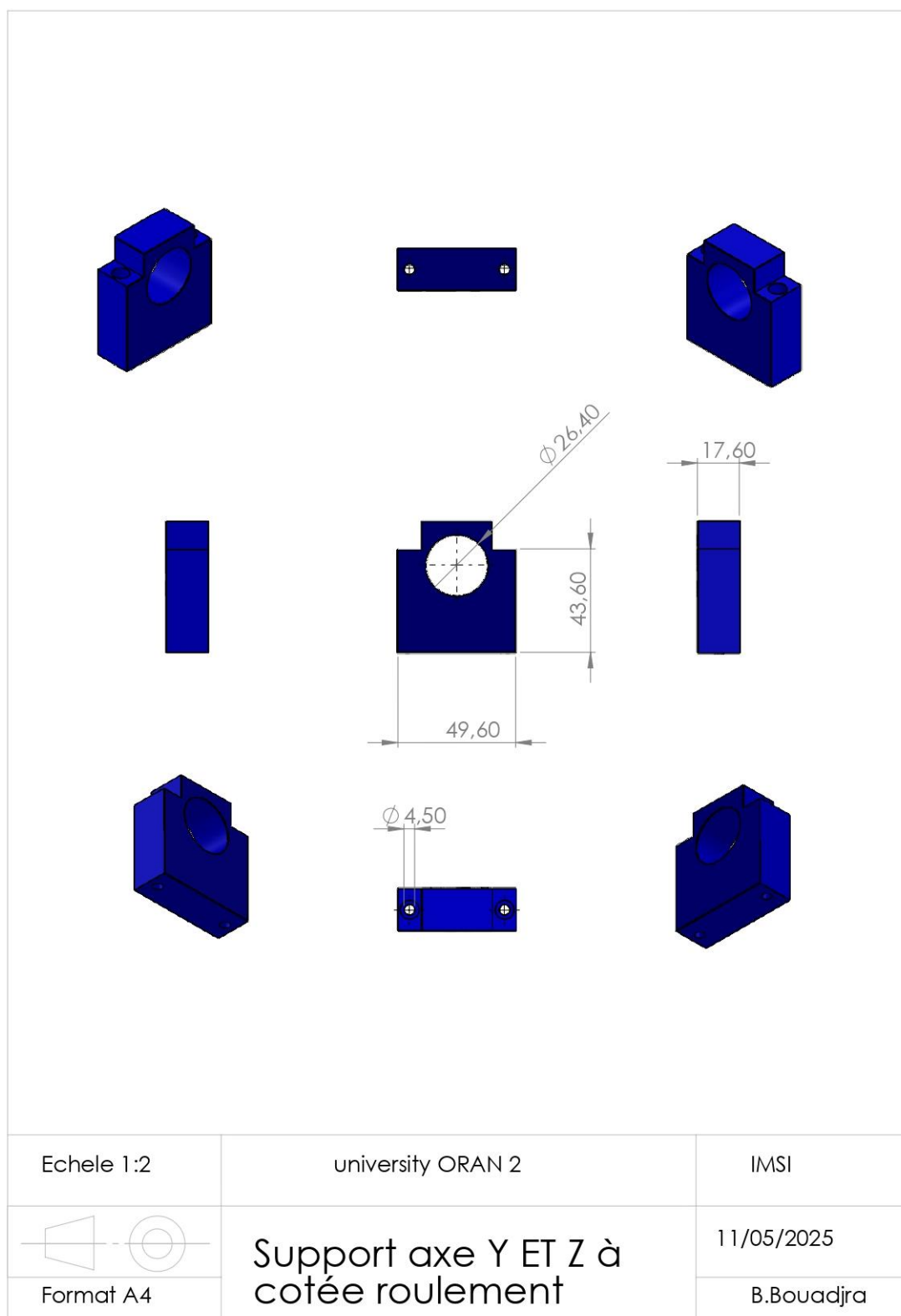
En conclusion, ce projet a posé les bases techniques et économiques pour une machine CNC modulaire, évolutive et accessible, adaptée aux besoins des étudiants, des chercheurs, des artisans et des passionnés de fabrication numérique.

Annexe Dessins techniques des supports









Les Références Bibliographiques :

1. Hamid, Mr CHATBI. Réalisation d'une commande pour une machine CNC. Université de Bouira, Algérie, 2017.
2. Prototech Asia. (2022). Histoire de l'usinage CNC. [En ligne]. Consulté le 26 février 2022. Disponible sur : <https://prototechasia.com/usinage-plastique-cnc/histoire-usinage-cnc>
3. Benabied, Djamel et Abdelmezziane, Mohammed Raïd. (2019/2020). Conception et réalisation d'une machine CNC. Mémoire de fin d'études, Institut de Mila.
4. Hubs. (2022). Le guide technique complet sur l'usinage CNC. [En ligne]. Consulté le 25 février 2022. Disponible sur : <https://www.hubs.com/fr/guides/usinage-cnc/>
5. Innowiki. (2019). Computer Numerical Control (CNC) Machine. [En ligne]. Consulté le 26 février 2022. Disponible sur : <https://innowiki.org/computer-numerical-control-cnc-machine/>
6. Guerrouabi, Chanez et Ait Rahmane, Roza. (2017/2018). Étude et conception d'une machine CNC (découpeuse laser). Mémoire de fin d'études, Université de Tizi-Ouzou.
7. SMAINI, Djamel et BEN KADI, Rafik. (2015). Conception et réalisation d'une machine. Mémoire de fin d'études, Université de Tizi-Ouzou.
8. Mennai, N., Lounis, C., et Bekouche, A. R. (s.d.). Moteur pas à pas : Guide d'installation, configuration et opération. USA : Mach3.
9. Les Moteurs pas à pas. Chaîne Youtube Mentalité Ingénieur. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=LGFNh-JwpEk>
10. (s.d.). Industrial Circuits – Stepper Motor Basics PDF.
11. ELECTROASTRO. Pas à pas. [en ligne]. [Consulté le 04 Mars 2018]. Disponible sur <<http://sam.electroastro.pagesperso-orange.fr/dossiers/pasapas/moteurpas2.htm>>
12. Wildi, Théodore and Gilbert, SYBILLE. Electrotechnique. 3ème Édition deboeck, 2000.
13. Dahmani, B., et Hadj Brahim, L. (s.d.). Programmation des Machines à Commande Numérique N340 M02.
14. Manuel de l'utilisateur de fraiseuse
<https://www.haascnc.com/fr/service/online-operator-s-manuals/mill-operator-s-manual/mill---g-codes.html>

15 Vectric. (s.d.). Aspire Vectric V9.0 – Manuel d'utilisateur. [En ligne]. Consulté le 2 juin 2022. Disponible via extension Chrome :

<https://docs.vectric.com/docs/V9.0/Aspire/ENU/Help/Aspire.pdf>

16 Wikipédia. (2020). Tige filetée. [En ligne]. Consulté le 25 février 2022. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tige_filet%C3%A9e

17. DrufelCNC. (s.d.). BSMCE04U – Installation Manual.

18. Allegro Microsystems. (s.d.). A4988 – Datasheet.

19. Texas Instruments / Pololu. (s.d.). DRV8825 – Datasheet.

20, Shenzhen Biqu Technology. (s.d.). TMC2209-V1.2 – Manual.

21. TB6600 Stepper Motor Driver By Dr Robot Drive The Future.

22. Leadshine. (s.d.). SureStep™ Stepping Systems – User Manual.

23. Technomoussi. (s.d.). Fiche ressource : Capteur de fin de course. [En ligne].

Consulté le 15 avril 2022. Disponible sur :

http://technomoussi.free.fr/IMG/pdf/SEQ25-S2-Ressource_Capteurs_Fin_de_course.pdf

24. Wikipédia. (2020). Arrêt d'urgence (automatique). [En ligne]. Consulté le 22 avril 2022. Disponible sur :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Arr%C3%AAt_d%27urgence_\(automatique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arr%C3%AAt_d%27urgence_(automatique))

25. Qu'est-ce qu'un relais ? Types, fonction et ses applications. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.electronew.com/blog/fr/relais-types-et-fonctionnement/>

26. Principe de fonctionnement d'un relais électromagnétique. [En ligne]. Disponible sur : <https://transfo.estelenerg.org/definition/principe-de-fonctionnement-dun-relais-electromagnetique/>

25. HOW TO BUILD YOUR CNC MACHINE BY patrick hood-Daniel & James Floyd Kelly

26. CNC MACHINING HANDBOOK by Alan Overby.