

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département D'Electromécanique



---

## Mémoire de fin d'études de MASTER

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème :

Contribution à la conception et à la réalisation d'une machine à  
commande numérique à 4 axes

**Réalisé par** : Lalam Yacine

Yahia Mohammed

**Proposé et dirigé par** :

M. Belgaid Hocine

*Mémoire soutenu publiquement le dimanche 29 septembre 2024, devant le jury  
composé de :*

|                   |     |                   |       |
|-------------------|-----|-------------------|-------|
| M. Boumrar Akli   | MAA | Président du jury | UMMTO |
| M. Slimani Ferhat | MCB | Examineur         | UMMTO |
| M. Belgaid Hocine | MCB | Encadreur         | UMMTO |

## **Remerciements**

Le premier remerciement est pour à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance et Sa miséricorde, ce projet n'aurait jamais pu être accompli.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant M. Belgaid.H dont les conseils et le soutien ont été d'une aide précieuse tout au long de cette aventure. Son expertise et sa disponibilité ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire. Sans oublier tout le corps professoral et administratif du département « Electromécanique».

Nos sincères remerciements vont également à notre famille notamment nos chères parents et à nos amis, qui ont été un pilier de soutien moral tout au long de cette période. Leur présence et leurs encouragements nous ont permis de surmonter les moments de doute et de difficulté.

Enfin, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué au succès de ce projet. Que ce soit par leur aide technique, leurs discussions enrichissantes ou leur soutien moral, chacun d'entre vous a joué un rôle important dans cette réalisation.

## *Dédicaces*

Nous dédions ce travail à :

À nos chers parents, Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Vous êtes notre source de force et d'inspiration, et c'est à vous que nous devons chaque étape de notre réussite.

À nos frères et sœurs, Pour leur présence, leurs encouragements, et leurs mots réconfortants dans les moments difficiles. Vous êtes nos compagnons de route, et ce travail vous est dédié en signe de notre profonde gratitude.

## Résumé :

Ce mémoire explore la conception et la réalisation d'une machine à commande numérique à quatre axes, en mettant particulièrement l'accent sur les aspects électriques, électroniques et de contrôle, tandis que la conception mécanique a été réalisée exclusivement à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Le système de contrôle repose sur un Raspberry Pi 4. La structure de ce mémoire se compose de cinq chapitres : le premier établit un état de l'art, le deuxième se concentre sur le routeur CNC à quatre axes, le troisième décrit les technologies employées, le quatrième examine les outils méthodologiques, et le cinquième détaille la réalisation du projet.

**Mots clés:** CNC, 4 axes, Raspberry Pi 4, G-code, PyCNC

## Abstract:

This thesis explores the design and realization of a four-axis numerical control machine, with particular emphasis on the electrical, electronic, and control aspects, while the mechanical design was carried out exclusively using computer-aided design (CAD) software. The control system is based on a Raspberry Pi 4. The structure of this thesis consists of five chapters: the first establishes a state of the art, the second focuses on the four-axis CNC router, the third describes the technologies employed, the fourth examines the methodological tools, and the fifth details the project's realization.

**Keywords:** CNC, 4 axes, Raspberry Pi 4, G-code, PyCNC

## المخلص:

تتناول هذه الرسالة تصميم وتصنيع آلة ذات تحكم رقمي بأربعة محاور، مع التركيز بشكل خاص على الجوانب الكهربائية والإلكترونية وعناصر التحكم، في حين تم التصميم الميكانيكي باستخدام برنامج التصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAD) فقط. يستند نظام التحكم إلى Raspberry Pi 4. تتكون هيكلياً هذه الرسالة من خمسة فصول: الأول يحدد حالة الفن، والثاني يركز على جهاز التوجيه CNC بأربعة محاور، والثالث يصف التقنيات المستخدمة، والرابع يستعرض الأدوات المنهجية، وأخيراً، يوضح الفصل الخامس تحقيق المشروع.

**الكلمات المفتاحية :** CNC, 4 axes, Raspberry Pi 4, G-code, PyCNC.

# Table des matières

|   |             |
|---|-------------|
| Remerciements .....   | <u>i</u>    |
| Dédicaces .....   | <u>ii</u>   |
| Résumé : .....  | <u>iii</u>  |
| Table des matières .....  | <u>iv</u>   |
| Liste des figures .....   | <u>iiiv</u> |
| Liste des Tableaux : .....  | <u>x</u>    |
| Notations et Abréviations : .....                                   | <u>xi</u>   |
| <b>Introduction Générale.....</b>                                   | <b>1</b>    |
| <b>I.1 Introduction.....</b>  | <b>4</b>    |
| I.2 Historique .....  | 5           |
| I.3 Définition de la commande numérique .....                       | 8           |
| I.4 Définition de La machine-outil à commande numérique.....        | 8           |
| I.5 Principe de fonctionnement d'une MOCN.....                      | 8           |
| I.5.1 Conception Assistée par Ordinateur.....                       | 9           |
| I.5.2 Fabrication Assistée par Ordinateur .....                     | 10          |
| I.6 La structure d'une MOCN.....                                    | 11          |
| I.7 Les différents types de MOCN.....                               | 11          |
| I.8 Classification des MOCN.....                                    | 12          |
| I.8.1 Classification des MOCN selon le mode de fonctionnement ..... | 12          |
| I.8.1.1 Fonctionnement en boucle ouvert .....                       | 12          |
| I.8.1.2 Fonctionnement avec commande adaptative .....               | 12          |
| I.8.1.3 Fonctionnement en boucle fermé.....                         | 13          |
| I.8.2 Classification des MOCN selon le mode d'usinage.....          | 14          |
| I.8.2.1 Commande numérique point à point.....                       | 14          |
| I.8.2.2 Commande numérique axiale.....                              | 15          |
| I.8.2.3 Commande numérique de contournage .....                     | 15          |
| I.8.3 Classification des MOCN selon le nombre d'axe .....           | 16          |
| I.9 Domaine d'utilisation de MOCN .....                             | 16          |
| I.10 Avantages et inconvénients de la MOCN .....                    | 16          |
| I.10.1 Avantages de la CNC .....                                    | 16          |
| I.10.2 Inconvénients de la CNC.....                                 | 17          |
| I.11 Conclusion.....  | 18          |
| <b>Chapitre 2 : Routeur 4 axes.....</b>                             | <b>20</b>   |
| II.1 Introduction .....   | 20          |

|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| II.2              | Présentation du Routeur 4 axes .....                 | 21        |
| II.2.1            | Parties de la machine .....                          | 21        |
| II.2.1.1          | La table.....  | 21        |
| II.2.1.2          | Le portique .....                                    | 21        |
| II.2.1.3          | Le mandrin .....                                     | 21        |
| II.3              | Principe de fonctionnement.....                      | 23        |
| II.3.1            | Conception du modèle 3D .....                        | 24        |
| II.3.2            | Génération du G code.....                            | 24        |
| II.3.3            | Usinage.....   | 24        |
| II.4              | Domaine d'application .....                          | 25        |
| II.5              | Avantages et inconvénients .....                     | 26        |
| <b>Chapitre 3</b> | <b>technologie utilisé.....</b>                      | <b>28</b> |
| III.1             | Introduction .....                                   | 28        |
| III.2             | Partie mécanique .....                               | 29        |
| III.2.1           | Le système de guidage .....                          | 29        |
| III.2.1.1         | Arbre de guidage.....                                | 29        |
| III.2.1.2         | Douille à billes linéaire .....                      | 30        |
| III.2.2           | Système de transmission .....                        | 32        |
| III.2.2.3         | Éléments de transmission.....                        | 32        |
| III.2.2.4         | Pignon et crémaillère .....                          | 32        |
| III.2.2.5         | Courroie et poulie .....                             | 33        |
| III.2.2.6         | Vis trapézoïdale et écrou :.....                     | 34        |
| III.2.3           | Châssis.....   | 36        |
| III.3             | Partie électrique.....                               | 37        |
| III.3.1           | Alimentation à découpage .....                       | 37        |
| III.3.1.1         | Modèle (S-120-12).....                               | 37        |
| III.3.2           | Raspberry Pi .....                                   | 37        |
| III.3.2.1         | Raspberry Pi Modèle 4 B.....                         | 38        |
| III.3.2.2         | Caractéristiques.....                                | 39        |
| III.3.2.3         | Ses Specification .....                              | 39        |
| III.3.2.4         | Broches entrées-sorties (GPIO) .....                 | 42        |
| III.3.3           | Moteur pas-à-pas .....                               | 42        |
| III.3.3.1         | Généralités et fonctionnement .....                  | 42        |
| III.3.3.2         | Types de moteurs .....                               | 43        |
| III.3.3.3         | Comparaison des trois types de moteur pas à pas..... | 44        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| III.3.3.4                                       | Types de câblage .....                                  | 45        |
| III.3.3.5                                       | Modes de commande .....                                 | 48        |
| III.3.3.6                                       | Domaines d'applications .....                           | 50        |
| III.3.3.7                                       | Avantages et inconvénients des moteurs pas à pas .....  | 50        |
| III.3.3.8                                       | Moteur pas-à-pas NEMA 23 .....                          | 51        |
| III.3.4   | Le Contrôleur TB6600 .....                              | 52        |
| III.3.4.1                                       | Caractéristiques et fonctionnement .....                | 52        |
| III.3.4.2                                       | Tableau de la configuration des interrupteurs DIP ..... | 53        |
| III.3.4.3                                       | Les entrées / sorties .....                             | 54        |
| III.3.5   | Broche d'usinage .....                                  | 55        |
| III.3.5.1                                       | Fonctionnement De La Broche Principale .....            | 56        |
| III.3.5.2                                       | Types de broche .....                                   | 56        |
| III.3.6   | Capteur fin de course .....                             | 58        |
| III.3.7   | Système d'affichage .....                               | 58        |
| III.3.7.1                                       | Raspberry Pi Touch Display .....                        | 58        |
| III.4   | Conclusion .....  | 60        |
| <b>Chapitre 4 : Outils méthodologique .....</b> |   | <b>62</b> |
| IV.1  | Introduction .....                                      | 62        |
| IV.2  | Outils méthodologiques .....                            | 63        |
| IV.2.1  | SOLIDWORKS .....  | 63        |
| IV.2.1.1  | Généralités .....                                       | 63        |
| IV.2.1.2  | Interface utilisateur Solidworks .....                  | 63        |
| IV.2.2  | PyCNC .....   | 65        |
| IV.2.2.1  | Généralités .....                                       | 65        |
| IV.2.2.2  | Architecture du programme : .....                       | 66        |
| IV.2.2.3  | G-code .....  | 66        |
| IV.2.3  | Fritzing : .....  | 68        |
| IV.2.3.1  | Généralités .....                                       | 68        |
| IV.2.3.2  | Avantage de Fritzing .....                              | 69        |
| IV.2.4  | Raspberry Pi OS .....                                   | 69        |
| IV.2.4.1  | Généralités .....                                       | 69        |
| IV.2.4.2  | Caractéristiques .....                                  | 69        |
| IV.2.4.3  | Contenu .....   | 69        |
| IV.2.4.4  | Interface graphique .....                               | 70        |
| IV.3  | Conclusion : .....                                      | 71        |

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| <b>Chapitre 5 : Réalisation .....</b>                                   | <b>73</b>                          |
| V.1 Introduction .....  | 73                                 |
| V.2 Partie électrique .....   | 74                                 |
| V.2.1 Conception du circuit de la machine .....                         | 74                                 |
| V.2.2 Simulation du circuit .....                                       | 76                                 |
| V.2.3 Réalisation du circuit.....                                       | 76                                 |
| V.3 Partie mécanique .....  | 78                                 |
| V.3.1 Conception des pièces mécanique.....                              | 78                                 |
| V.3.1.1 Conception de la table.....                                     | 78                                 |
| V.3.1.2 Conception du portique.....                                     | 80                                 |
| V.3.1.3 Conception du mandrin.....                                      | 80                                 |
| V.3.1.4 Assemblage des pièces :.....                                    | 80                                 |
| V.3.2 Génération du code G.....   | 81                                 |
| V.4 Partie commande .....   | 81                                 |
| V.4.1 Installation d'un système d'exploitation sur le Raspberry Pi..... | 81                                 |
| V.4.2 Configuration du programme PyCNC.....                             | 82                                 |
| V.5 Conclusion.....   | 89                                 |
| <b>Conclusion Générale .....</b>  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| <b>Bibliographie: .....</b>   | <b><u>xc</u></b>                   |

## Liste des figures :

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : la machine à aléser de John Wilkinson.....   | 5  |
| Figure 2 : des cartes perforées.....  | 5  |
| Figure 3 : Une carte perforée de style IBM à 80 colonnes.....   | 6  |
| Figure 4 : Méthode et appareil pour contrôler le mécanisme des navires ou des véhicules en mouvement.....   | 6  |
| Figure 5 : La fraiseuse à commande numérique originale de 1952 du MIT était une machine Cincinnati Milling Machine Company Hydro-Tel à 3 axes modifiée.....                 | 7  |
| Figure 6 : Processus de Conception Assistée par Ordinateur.....   | 9  |
| Figure 7: Processus de Fabrication Assistée par Ordinateur.....   | 10 |
| Figure 8 : Système de Contrôle Numérique par Ordinateur [5].....  | 11 |
| Figure 9 : Fonctionnement en boucle ouvert.....   | 12 |
| Figure 10 : Fonctionnement avec commande adaptative.....  | 13 |
| Figure 11 : Fonctionnement en boucle fermé.....   | 14 |
| Figure 12 : Commande numérique point à point.....   | 15 |
| Figure 13 : Commande numérique par axiale.....  | 15 |
| Figure 14 : Commande numérique de contournage.....  | 16 |
| Figure 15: présentation des parties et composant de notre machine CNC 4 axe.....  | 22 |
| Figure 16: Arbre de guidage.....  | 30 |
| Figure 17 : douille à bille linéaire.....   | 31 |
| Figure 18 : système de guidage -Arbre et douille à bille linéaire-.....   | 32 |
| Figure 19: système de transmission - poulie-courroie-.....  | 34 |
| Figure 20 : Vis trapézoïdale et écrou.....  | 35 |
| Figure 21: accouplement flexible.....   | 36 |
| Figure 22 tubes métallique carré.....   | 36 |
| Figure 23: modèle de l'alimentation à découpage.....  | 37 |
| Figure 24: la carte Raspberry Pi Modèle 4 B.....  | 39 |
| Figure 25: Caractéristique et Spécification de la RPI 4B.....   | 41 |
| Figure 26: broche GPAO (General Purpose Input/Output du Raspberry Pi.....   | 42 |
| Figure 27 : Rotor et Stator d'un moteur pas-à-pas.....  | 43 |
| Figure 28: moteur pas à pas à réluctance variable.....  | 43 |
| Figure 29: moteur pas-à-pas à aimants permanents.....   | 44 |
| Figure 30 : moteur pas à pas hybrides.....  | 44 |
| Figure 31 : Moteur pas à pas bipolaire et la connexion de ses enroulements (à gauche) /<br>moteur pas à pas unipolaire et la connexion de ses enroulements (à droite.)..... | 46 |
| Figure 32 : Domaines de fonctionnement du moteur pas à pas.....   | 47 |
| Figure 33: modes de commande, mode 1 en pas entiers.....  | 48 |
| Figure 34: modes de commande, mode 2 en pas entiers.....  | 48 |
| Figure 35 : modes de commande, mode demi-pas.....   | 49 |
| Figure 36 : modes de commande, mode micro-pas.....  | 50 |
| Figure 37 : moteur pas-à-pas, NEMA 23.....  | 52 |
| Figure 38 : différentes entres/sorties du TB6600, contrôleur de moteur pas à pas.....   | 55 |
| Figure 39: broche d'usinage.....  | 56 |
| Figure 40: capteur de fin de course.....  | 58 |
| Figure 41: Raspberry Pi Touch Display et ses composants.....  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 42: logo du logiciel Solidworks .....  | 63 |
| Figure 43: Element de l'interface principale .....  | 64 |
| Figure 44 Logo PyCNC.....   | 66 |
| Figure 45 : Architecture du Programme PyCNC .....   | 66 |
| Figure 46: Un exemple d'une section de G-code.....  | 67 |
| Figure 47 : Logo Fritzing .....   | 69 |
| Figure 48 : interface graphique de la distribution Raspbian .....                           | 70 |
| Figure 49 : circuit électrique complet de la CNC 4 axes .....                               | 75 |
| Figure 50: mesure avec multimètre .....   | 76 |
| Figure 51: vue de dessus du câblage entre les composant électrique.....                     | 77 |
| Figure 52 : vue de dessus du circuit électrique .....                                       | 78 |
| Figure 53: conception de la table avec élément mécano-soudé .....                           | 79 |
| Figure 54 : conception du portique avec l'élément mécano-soudé.....                         | 80 |
| Figure 55 : conception du mandrin avec l'élément mécano-soudé.....                          | 80 |
| Figure 56: vue d'en face de la cnc 4 axes après assemblage de toutes les pièces .....       | 80 |
| Figure 57 : méthode de génération du code G .....   | 81 |
| Figure 58: méthode de génération du code G .....  | 81 |
| Figure 59: Programme Raspberry Pi Imager.....   | 82 |
| Figure 60 : Un des codes de base modifié fonctionnant sur Raspberry Pi 4.....               | 85 |
| Figure 61 : le fichier config.py des caractéristiques machine modifiée selon notre CNC..... | 86 |
| Figure 62 : création del'interface graphique de la bibliothèque graphique PyQt6.....        | 87 |
| Figure 63: interface graphique, Accueille .....   | 88 |
| Figure 64: interface graphique, fenêtre de configuration paramètre machine .....            | 89 |

## Liste des Tableaux :

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 différents parties et pieces de la cnc 4 axes, légende figure15 .....              | 23 |
| Tableau 2 : avantage et inconvénients des CNC 4 axes .....                                   | 26 |
| Tableau 3: avantages et inconvénients des arbres de guidage.....                             | 30 |
| Tableau 4: avantage et inconvénients douille à bille linéaire.....                           | 31 |
| Tableau 5 : Avantages et inconvénients système pignon crémaillère .....                      | 33 |
| Tableau 6 avantages et inconvénients système courroie et poulie .....                        | 34 |
| Tableau 7: Avantages et inconvénients vis trapézoïdales .....                                | 35 |
| Tableau 8 : comparaison des trois types de moteur pas-à-pas .....                            | 45 |
| Tableau 9: comparaison moteurs unipolaires et bipolaire.....                                 | 46 |
| Tableau 10 : Avantages et Inconvénients des moteurs pas à pas .....                          | 51 |
| Tableau 11 : Tableau de la configuration des interrupteurs DIP du contrôle de courant.....   | 53 |
| Tableau 12 : Tableau de la configuration des interrupteurs DIP du contrôle du micro-pas..... | 54 |
| Tableau 13: composants du circuit de la machine et leurs quantités .....                     | 74 |

## **Notations et Abréviations :**

**CNC** : Commande Numérique par Calculateur

**MOCN** : Machine-Outil à Commande Numérique

**ARM** : (Anciennement un acronyme pour Advanced RISC Machines)

**CFAO** : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur.

**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur.

**FAO** : Fabrication Assisté par Ordinateur

**DCN** : Directeur de Commande Numérique

# Introduction Générale

Les machines à commande numérique ont un rôle clé dans l'évolution de l'industrie moderne. Leur capacité à automatiser les processus de fabrication permet d'accroître la précision, la rapidité et la répétabilité des opérations complexes, tout en réduisant les erreurs humaines. Depuis leur introduction dans les années 1950, ces machines révolutionnaires ont transformé le paysage industriel en devenant des outils incontournables dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'industrie automobile, l'électronique ou encore la production d'outils spécialisés.

Les technologies de machine à commande numérique (MOCN ou CNC) se basent sur l'utilisation d'un logiciel spécialisé pour automatiser les processus et répondre aux besoins croissants en termes d'efficacité et d'adaptabilité. L'utilisation d'une machine CNC permet une commande simultanée sur plusieurs axes en mouvement offrant ainsi une grande liberté pour la création artistique ou industrielle. La machine CNC peut fonctionner selon diverses configurations d'axes allant généralement de 2 à 5 axes ou plus, selon la complexité des pièces à usiner. Cette polyvalence permet aux machines CNC d'être adaptées à divers projets allant de la production d'éléments simples à la fabrication d'objets hautement pointus en termes de détails techniques et de précision.

La conception et la fabrication des machines CNC exigent une intégration méticuleuse entre les composants mécaniques, électroniques et informatiques. Il est nécessaire de comprendre les caractéristiques de chaque élément pour optimiser le processus d'usinage. Les moteurs, les broches, les systèmes de transmission, les contrôleurs et les logiciels de programmation doivent tous interagir de manière cohérente pour garantir des performances optimales.

Dans ce projet de fin d'études, nous nous proposons de concevoir un routeur CNC à 4 axes où la partie électrique sera conçue et réalisée, tandis que la partie mécanique sera exclusivement conçue. Le cahier des charges globales, de la machine, établi après études préliminaire est le suivant :

En termes de spécification fonctionnelle, notre routeur CNC 4 axes devra être capable de réaliser des opérations d'usinage de pièce allant de forme simple à complexe comme le fraisage de pièces cylindriques ou la gravure sur des surfaces 3D. Permettant ainsi le travail sur des pièces ayant ou pas une géométrie cylindrique ou des formes nécessitant un usinage sous différents angles. Le routeur devra permettre l'usinage de différents types de matériaux selon la broche et l'outil dont il est équipé, offrir une précision d'au moins 0,1 mm, garantir une répétabilité des opérations et une capacité de production améliorée. De plus il est nécessaire que le système informatique soit en mesure d'interpréter le G-code requis à l'usinage automatisé et gérer par de différents logiciels de conception assisté par ordinateur.

En ce qui concerne les spécifications techniques de notre machine, notamment les caractéristiques matérielles ainsi que les composants mécaniques et électroniques, Nous avons opté pour la configuration suivante:

Comme système de transmission, le routeur sera équipé de « Pignon et crémaillère » pour les deux axes X et Y, d'une « courroie et poulie » pour l'axe A (le mandrin) ainsi que

d'une vis trapézoïdale et écrou pour l'axe Z. Et comme système de guidage, il sera équipé « douilles à bille et arbre de guidage ».

Le châssis sera fabriqué en tubes métalliques carrés soudés à l'arc.

Dimensions de la structure :

- La course des trois axes  $X = 1000$  mm,  $Y = 800$  mm,  $Z = 100$  mm.
- Surface de la zone de travail =  $800\,000\text{mm}^2$ .

Pour les composants électriques de la CNC, nous avons choisi d'utiliser une alimentation à découpage qui délivre une puissance de 3000 watts (L'alimentation électrique doit avoir une puissance suffisante pour tous les composants de la machine), des moteurs pas-à-pas bipolaires avec 200 pas par tour (1,8 degrés), alimentés en 48VDC, (moteur fonctionnant avec 3,08 v utilisation directe du moteur) et consomme 2 800 mA par bobine. Leur couple est de  $19,0\text{ kg}\cdot\text{cm}$  (1,89 Nm) et leurs dimensions sont de (56 x 56 x 76 mm). Nous avons opté pour une broche de 500 W à 2 kW (adéquat aux propriétés d'usinage ainsi que les dimensions et type de matériaux).

Enfin, un système de commande numérique installé et utilisé sur un nano-ordinateur mono carte, le Raspberry Pi 4 modèle B, avec un processeur ARM quad-core 64 bits et une mémoire ram de 8 Go LPDDR4 ainsi qu'une large possibilité de connexion pour pouvoir réagir avec tous les autres composants qui seront d'ailleurs utilisés dans le projet comme les contrôleurs des moteurs pas-à-pas et les capteurs de fin de course. La carte devra être compatible avec les programmes d'interprétation de G-code et assurera une interface utilisateur efficace et une gestion optimale des opérations d'usinage.

Le plan du mémoire est structuré en cinq chapitres principaux. Le premier chapitre, État de l'art, introduit l'historique et les concepts de la commande numérique et des machines-outils à commande numérique (MOCN), expliquant leur principe de fonctionnement, leurs structures et les différentes classifications en fonction du mode de fonctionnement, du mode d'usinage et du nombre d'axes. Le second chapitre, Routeur 4 axes, présente la machine, ses différentes parties, son principe de fonctionnement, ses domaines d'application ainsi que ses avantages et inconvénients. Le troisième chapitre, Technologie utilisée, aborde les aspects mécaniques et électroniques du routeur, notamment les systèmes de guidage, de transmission, les composants comme le Raspberry Pi, les moteurs pas-à-pas, et la broche. Le quatrième chapitre, Outils méthodologiques, traite des logiciels et outils utilisés dans la conception, tels que SOLIDWORKS et PyCNC. Enfin, le cinquième chapitre, Réalisation, décrit la mise en œuvre concrète du projet.

Ce travail a pour ambition de fournir une machine CNC qui devra être compétitive en termes de rapport qualité / prix et plutôt « lowcost ».

---

***Chapitre I :***  
***Etat de l'art***

---

# Chapitre 1 : Etat de l'art

## I.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies de l'information et de la communication a transformé de nombreux secteurs industriels, y compris la fabrication. Au cœur de cette transformation se trouve la Commande Numérique par Calculateur (CNC), une technologie révolutionnaire qui permet de contrôler les machines-outils avec une précision et une efficacité inégalées. L'intégration de la CNC dans les processus de production a radicalement changé la manière dont les pièces sont fabriquées, permettant des niveaux de complexité et de précision auparavant inaccessibles avec les méthodes traditionnelles [1].

Ce chapitre explore en profondeur les divers aspects de la CNC, en commençant par un aperçu historique pour comprendre les origines et les évolutions de cette technologie. Nous définirons ensuite ce qu'est la CNC et comment elle diffère des autres technologies de commande. Une attention particulière sera portée à la Machine-Outil à Commande Numérique (MOCN), un élément central de cette technologie, et nous détaillerons son principe de fonctionnement, incluant la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), deux étapes cruciales du processus de fabrication numérique [1].

Nous analyserons également la structure des machines CNC, décrivant les composants essentiels et leur rôle dans le fonctionnement global de la machine. Les différents types de MOCN seront passés en revue, ainsi que leurs classifications basées sur divers critères tels que le mode de fonctionnement, le mode d'usinage et le nombre d'axes. Chaque classification offre une perspective unique sur la manière dont ces machines peuvent être utilisées pour diverses applications industrielles.

En outre, ce chapitre se penchera sur les domaines d'utilisation des MOCN, illustrant la vaste gamme d'applications industrielles où la CNC joue un rôle vital. Nous évaluerons les avantages de la CNC, tels que l'amélioration de la précision, la réduction des déchets et l'augmentation de la productivité, tout en reconnaissant les inconvénients potentiels, comme le coût initial élevé et les besoins en formation spécialisée.

En fin de compte, ce chapitre vise à fournir une compréhension exhaustive de la Commande Numérique par Calculateur, soulignant son importance dans la modernisation des processus de fabrication et son impact significatif sur l'industrie manufacturière contemporaine.

## I.2 Historique

L'histoire des machines-outils à commande numérique (CNC) est étroitement liée à celle des machines-outils en général. Les premières machines-outils, telles que le tour à poterie et le métier à tisser, tous deux inventés vers 3000 av. J.-C., ont posé les bases du travail des matériaux avec précision. Au fil des siècles, des inventions comme la machine à vapeur et la machine-outil universelle ont permis d'accroître la puissance, la flexibilité et la précision de ces machines.

On ne peut énumérer toutes les inventions qui ont précédé la création des CNC, que ce soit en raison de leur grand nombre ou de l'incertitude historique quant à leur véracité. Cependant, plusieurs inventions étaient cruciales pour jeter les bases du développement de ces machines. Tout d'abord, un hommage doit être rendu à ce qui est largement considéré comme la première machine-outil : en 1775, la machine à aléser de John Wilkinson était une solution précieuse pour usiner avec précision des cylindres destinés aux moteurs à vapeur. De même, sa machine à aléser de canons originale a résolu les problèmes de précision rencontrés dans sa première invention. [1]

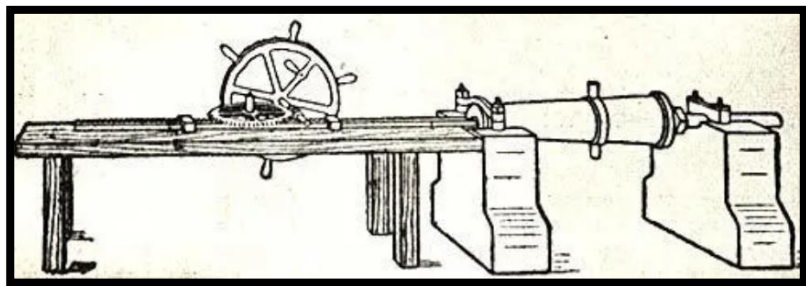


Figure 1 : la machine à aléser de John Wilkinson

Un élément largement considéré comme fondamentale pour ce qui allait devenir l'informatique moderne est retrouvé « les cartes perforées ». En 1805, Joseph Marie Jacquard a perfectionné et simplifié le concept inventé en 1725 par le travailleur textile français Basile Bouchon. Il a renforcé et automatisé le processus en attachant des cartes perforées plus solides en séquence pour contrôler les métiers à tisser.

En 1812, malgré la résistance initiale des tisserands de soie de l'époque, les métiers Jacquard étaient déjà largement utilisés en France, avec 11 000 en fonctionnement, montrant ainsi l'acceptation rapide de cette innovation par l'industrie textile. Les cartes perforées se développèrent tout au long de la seconde moitié du XIXe siècle et trouvèrent de nombreuses applications, de la télégraphie aux pianos à la lecture automatique.



Figure 2 : des cartes perforées

Alors que les premières cartes déterminaient le contrôle mécanique, en 1889, Herman Hollerith a inventé un système électromécanique utilisant des cartes perforées pour le Bureau du

recensement des États-Unis. En 1896, il a créé la Tabulating Machine Company, qui plus tard a fusionné avec quatre autres sociétés pour devenir IBM en 1924. Dans la seconde moitié du XXe siècle, les cartes perforées ont été utilisées pour la saisie et le stockage de données dans les ordinateurs et les machines à commande numérique.

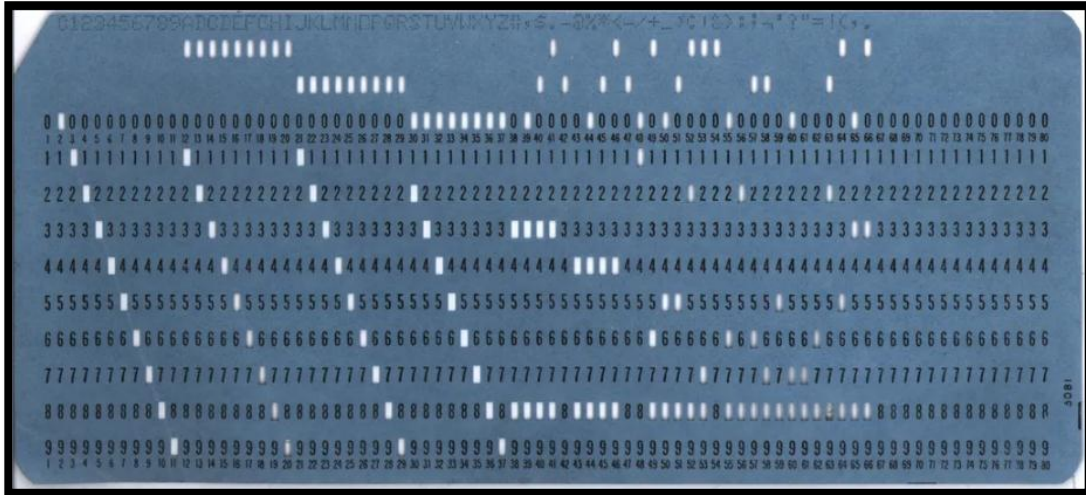


Figure 3 : Une carte perforée de style IBM à 80 colonnes

L'avènement du servomécanisme électrique est aussi crucial durant le développement des CNC. Il a été créé, pour la première fois, en Angleterre par H. Calendar en 1896. En 1940, le MIT (Massachusetts Institute of Technology), grâce au département de génie électrique, avait établi un laboratoire dédié aux servomécanismes. [1]

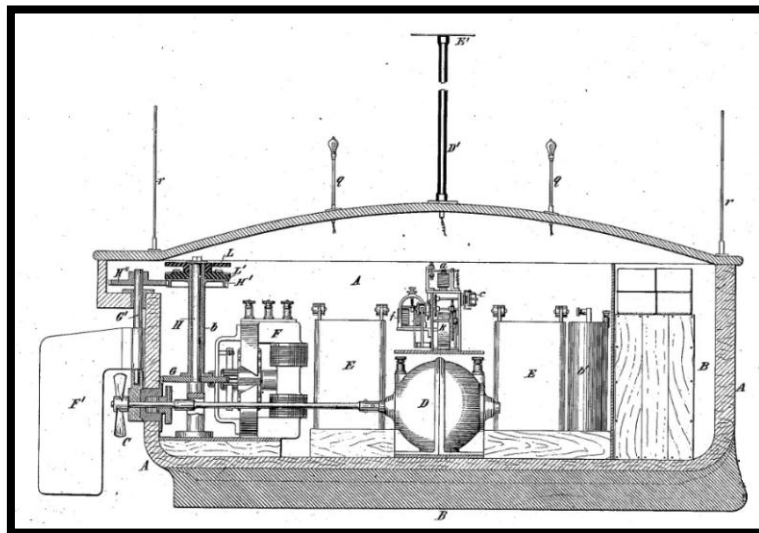


Figure 4 : Méthode et appareil pour contrôler le mécanisme des navires ou des véhicules en mouvement.

En 1947, dans l'État du Michigan, John Parsons (1913-2007), considéré comme le père du contrôle numérique, fabrique pour l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction, mais il réalise que sa méthode est trop approximative pour des pièces de formes complexes. Il confie alors au Massachusetts Institute of Technology en 1949 le développement des asservissements pour une machine pilotée par un lecteur de cartes, résultant en une fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale, présentée en septembre 1952 au Laboratoire des Servomécanismes du MIT, marquant ainsi l'avènement du contrôle numérique.

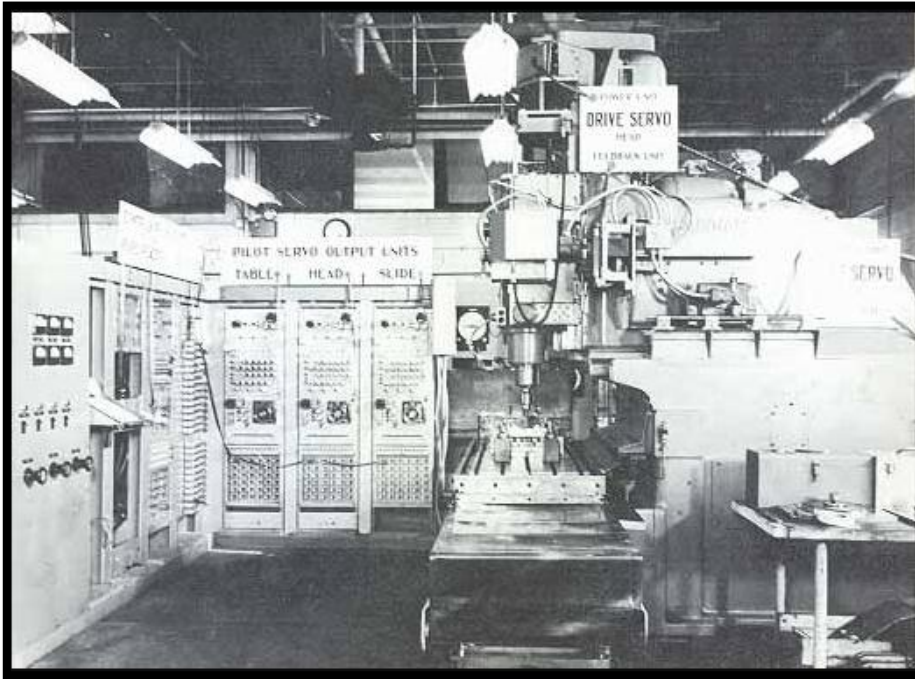


Figure 5 : La fraiseuse à commande numérique originale de 1952 du MIT était une machine Cincinnati Milling Machine Company Hydro-Tel à 3 axes modifiée.

Au sein du laboratoire même des servomécanismes du MIT, sous l'impulsion du groupe des Applications Informatiques, en 1956, le langage de programmation APT (Automatically Programmed Tool) a vu le jour. APT, conçu pour fonctionner avec la première machine à commande numérique du MIT, est rapidement devenu le standard pour la programmation des machines-outils contrôlées par ordinateur, largement utilisé dans les années 1970. Cette innovation, parrainée par l'Air Force, a finalement été rendue accessible au domaine public. Douglas T. Ross, à la tête du groupe des Applications Informatiques, est reconnu comme le père de l'APT, ayant également introduit le terme "conception assistée par ordinateur" (CAO) par la suite. [1]

Les microprocesseurs, dont l'usage s'est généralisé à partir des années 1970, ont révolutionné les capacités de contrôle et de traitement des machines CNC, ouvrant la voie à une précision et une complexité jamais atteintes auparavant. Parallèlement, l'introduction de la FAO (fabrication assistée par ordinateur) dans les années 1980 a permis d'automatiser et d'optimiser davantage les processus de fabrication, propulsant ainsi les CNC vers l'avant-garde de l'industrie manufacturière moderne. [1]

### I.3 Définition de la commande numérique

La commande numérique (CN) est une méthode de contrôle où les valeurs désirées d'une variable contrôlée sont spécifiées via un code numérique, principalement utilisée dans le domaine des machines-outils.

Elle repose sur une série d'automatismes où les instructions de mouvement ou de déplacement, la vitesse de ces déplacements et leur précision sont fournies à partir de données numériques codées sur des supports dédiés. C'est supports peuvent être représentés selon leur domaine d'application ou même leur époque, c'est justement le développement de ces support qui ont tracés l'histoire de la commande numérique, comme nous l'avons citez dans la partie Historique.

Nous pourrions donc citez parmi ces support : les cartes ou Rubans perforés, cassettes ou disquettes magnétiques (au début de l'évolution de la commande numérique) ou également les données numériques pouvant être simplement sauvegardés en « mémoires » dans le cas des dernières générations de commandes numérique à calculateur intégré(CNC).

### I.4 Définition de La machine-outil à commande numérique

La machine-outil à commande numérique (MOCN) constitue le principal domaine d'application de la commande numérique. Quand une machine-outil est dotée d'une commande numérique capable de réaliser les calculs des coordonnées des points qui définissent une trajectoire (interpolation), on la qualifie de machine à calculateur. On l'appelle alors CNC (Commande Numérique par Calculateur).

La commande numérique par ordinateur (CNC) est une méthode de fabrication qui automatise le contrôle, le mouvement et la précision des machines-outils grâce à l'utilisation de logiciels informatiques préprogrammés, intégrés dans les outils.

### I.5 Principe de fonctionnement d'une MOCN

Les activités de fonctionnement des machines à commande numérique sont structurées à travers des lettres, des symboles et des chiffres, formant ce que l'on appelle le pilote, connu sous le terme CNC. Ce système intègre l'ordinateur, la machine et le mécanisme de communication entre les deux. La définition des machines à commande numérique repose sur la connexion d'un ordinateur à une machine, avec un dispositif de traduction pour assurer leur compatibilité, autrement dit, une interface. Étant donné que la machine ne comprend pas directement le langage de l'ordinateur, ce dispositif est indispensable. [2]

Lorsque l'ordinateur est présent, les données sont transférées à l'entrée et à la sortie et comparées en mémoire ou sur l'appareil. Les capteurs sont lus et renvoyés à l'ordinateur pour comparer les entrées et les lectures des capteurs jusqu'à ce que nous atteignons le taux d'erreur le plus bas possible pour obtenir la plus grande précision et qualité des travaux CNC. [3]

- CAO (Conception Assistée par Ordinateur).
- FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur).
- Commande et fonctionnement de la machine.

### I.5.1 Conception Assistée par Ordinateur

Les systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) sont étroitement liés au développement des concepts de graphisme informatique. Cependant, les concepts de conception informatique vont bien au-delà de nombreux graphismes informatiques en termes d'analyse et de modélisation. Cependant, les graphismes interactifs par ordinateur (ICG) constituent une base technique nécessaire pour les systèmes de conception assistée par ordinateur. Il s'agit d'un logiciel qui nous permet de dessiner la pièce géométrique à fabriquer dans toutes les dimensions, puis de convertir la forme 2D en 3D si nécessaire.

Pour connaître les logiciels de CAO les plus célèbres de ces programmes :

- Mastercam
- Fusion 360
- ArtCAM

Il nous permet également de modéliser les pièces géométriques liées au mouvement, de répartir les contraintes, et aussi de tracer les courbes de force et de moment qui affectent les pièces techniques à produire. Ensuite, nous sauvegardons le fichier dans un format approprié

La figure 6 explique comment traiter les logiciels de CAO : Le croquis commence à partir de zéro et les réglages sont ajustés. Si nous avons besoin de dessiner en 2 dimensions, nous choisissons l'icône 2D ou si nous avons besoin de dessiner en 3 dimensions, nous choisissons l'icône 3D. Et nous pouvons transférer le design 2D en 3D via une option dans le logiciel. Après avoir terminé la conception, nous exportons le design vers des langages de programmation pour que la FAO puisse lire la conception [4].

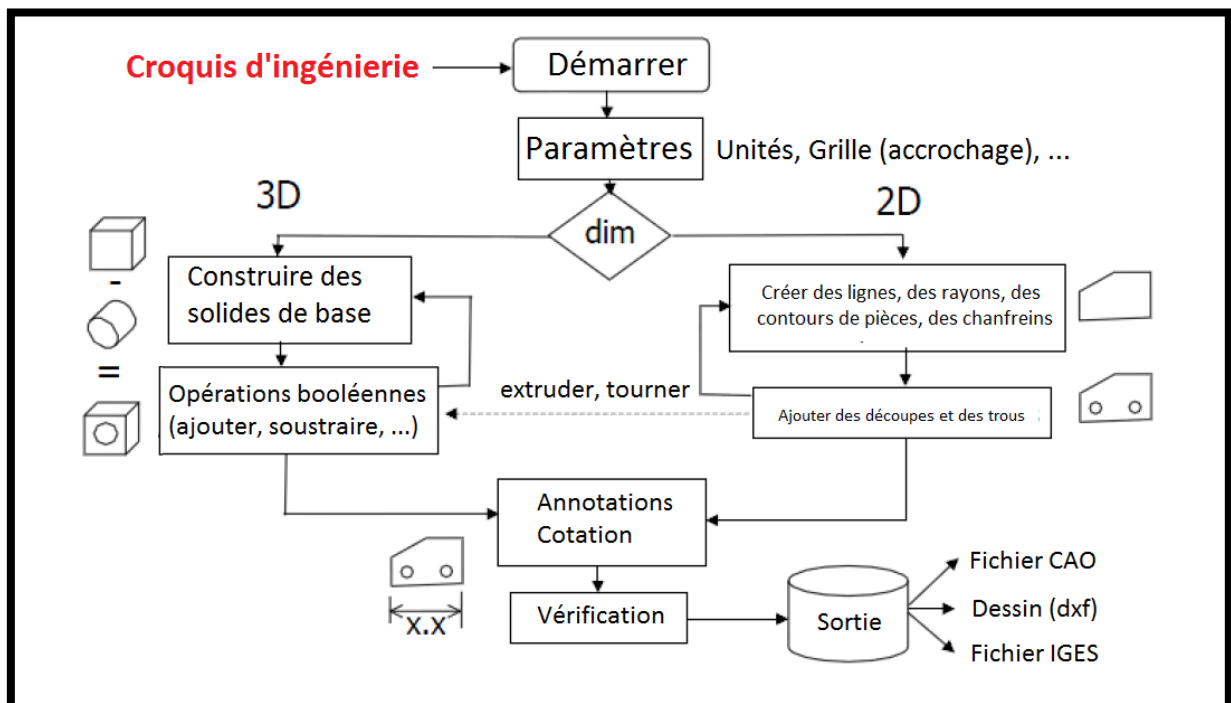


Figure 6 : Processus de Conception Assistée par Ordinateur

## I.5.2 Fabrication Assistée par Ordinateur

La fabrication assistée par ordinateur (FAO) est l'utilisation de systèmes informatiques pour planifier, organiser et contrôler les processus de fabrication par contact direct ou indirect avec les sites de production industrielle. Une pièce d'ingénierie conçue à l'aide d'un logiciel de CAO est convertie en GCODE par un logiciel de FAO, permettant à la machine CNC d'interpréter la conception. Ce GCODE est communiqué directement du programme à la machine CNC via un câble réseau ou indirectement via une mémoire flash, et les paramètres de la machine CNC sont ensuite déterminés pour le début de l'étape de fabrication.

Les logiciels les plus célèbres dans ce domaine sont :

- CATIA
- PowerMill
- SolidWorks
- Solidcam

La figure (suivante) montre et résume le flux de travail typique d'un système FAO. L'ordre de définition peut varier selon les systèmes FAO, mais la définition des données listées est requise dans chaque cas pour un travail approprié. L'application la plus importante des systèmes FAO est la technologie de fraisage, donc on se concentre ici sur cette application.

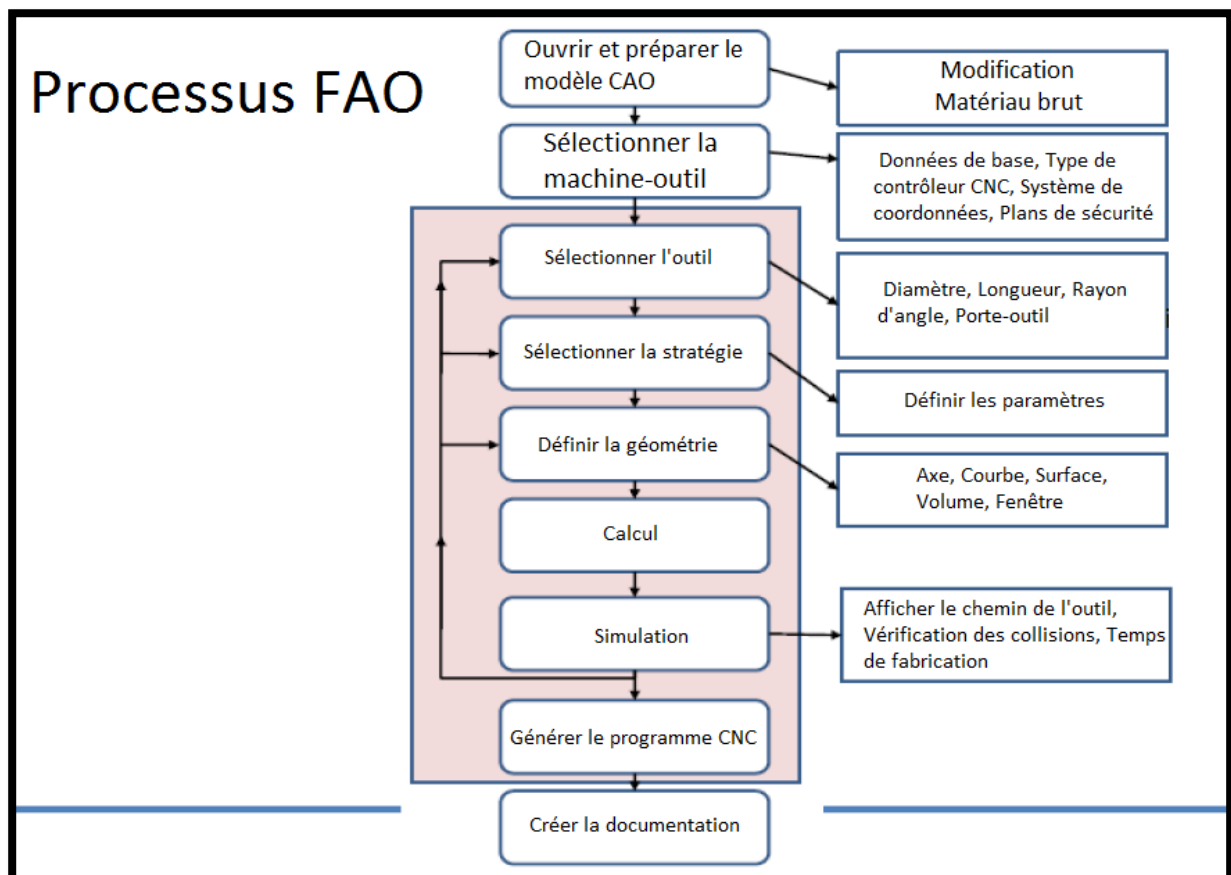


Figure 7: Processus de Fabrication Assistée par Ordinateur

## I.6 La structure d'une MOCN

Les systèmes de MOCN ou CNC (computer numerical control) comprennent les six éléments majeurs suivants, listés ci-dessous et illustrés dans la Figure 8 :

- **Unité de contrôle de la machine** : système basé sur PC, PLC, API etc. se compose d'unité de traitement des données et la boucle de contrôle.
- **Outil de la machine** : structure d'une machine, la partie opérative d'une machine.
- **Système de pilotage** : pilote de moteur, pilote pas à pas...
- **Dispositifs de rétroaction** : rétroaction en boucle fermée.
- **Dispositif d'entrée** : E-stop, interrupteur de fin de course...
- **Unité d'affichage** : interface graphique utilisateur (GUI).

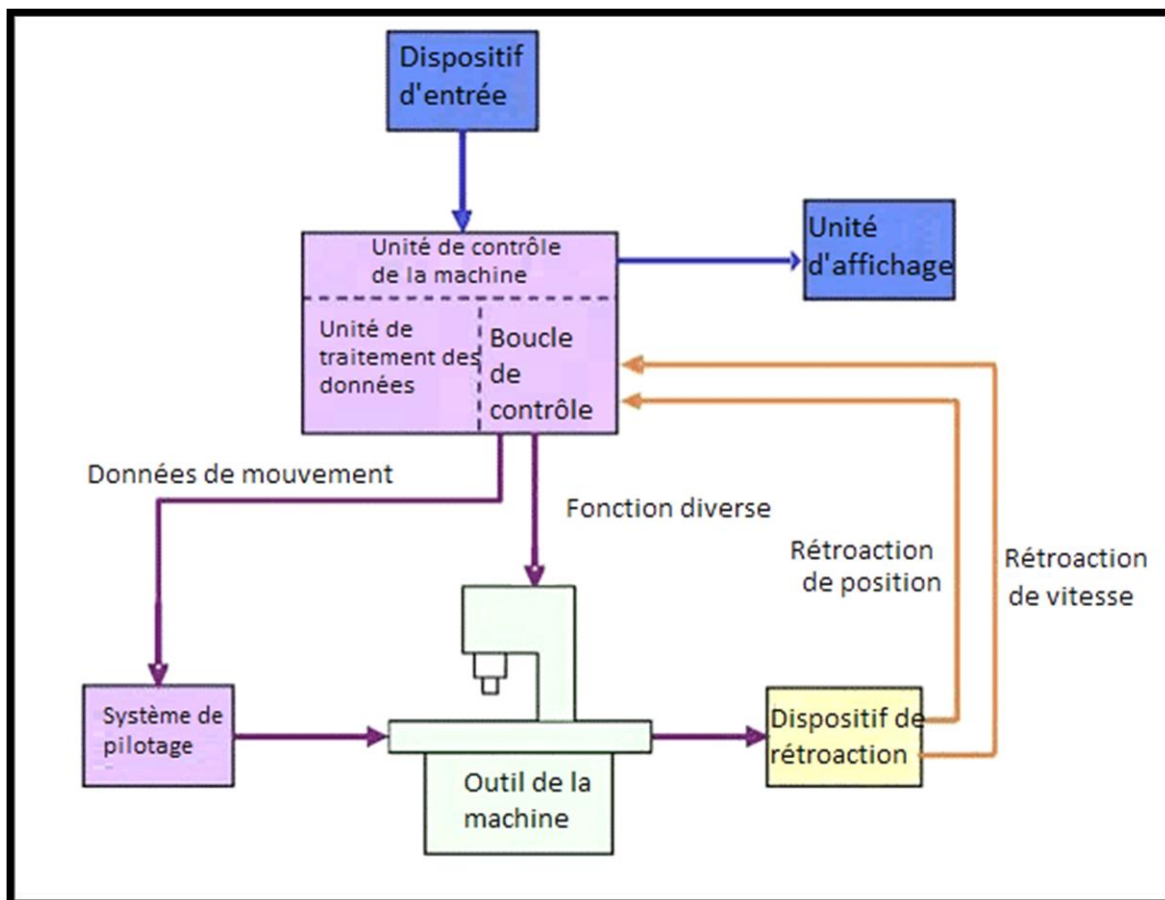


Figure 8 : Système de Contrôle Numérique par Ordinateur [5]

## I.7 Les différents types de MOCN

Les centres d'usinage sont des machines-outils utilisées pour l'enlèvement de matière, permettant d'effectuer automatiquement des opérations de fraisage, d'alésage, de perçage et de taraudage. Elles sont équipées d'un magasin d'outils avec changeur automatique et peuvent être dotées d'un dispositif automatique de chargement des pièces. L'ensemble de ces fonctions est géré par un ou plusieurs systèmes électroniques programmables tels que la commande numérique (CN), l'ordinateur ou l'automate programmable.

On distingue plusieurs types de machines :

- Les machines à enlèvement de copeaux : les perceuses, les tours, les centres de tournage, les fraiseuses, les centres d'usinage, les rectifieuses, etc.
- Les électroérosions : les machines à enfonçage, les machines à fil.
- Les machines de découpe : oxycoupage, laser, jet d'eau.
- Les presses : presses métallurgiques, presses d'injection plastique.
- Les machines spéciales : machines à panneaux, à têtes multiples, de conditionnement (pour l'agroalimentaire).

## I.8 Classification des MOCN

Les machines-outils à commande numérique (MOCN) sont classées suivant le :

- Mode de fonctionnement de la machine.
- Nombre d'axes de la machine.
- Mode d'usinage.

### I.8.1 Classification des MOCN selon le mode de fonctionnement

#### I.8.1.1 Fonctionnement en boucle ouvert

En boucle ouverte, comme l'illustre la Figure 9, est une forme de contrôle d'un système qui ne prend pas en compte la réponse de ce même système.

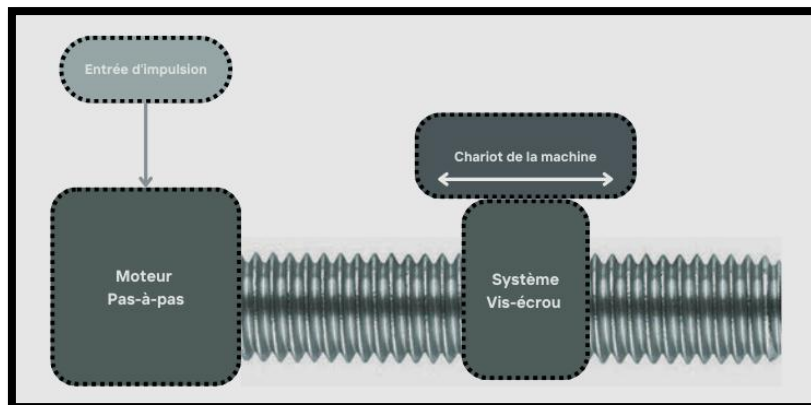


Figure 9 : Fonctionnement en boucle ouvert

#### I.8.1.2 Fonctionnement avec commande adaptative

La commande adaptative réalise d'une façon continue et automatique l'adaptation des Conditions de coupe. Des capteurs relèvent les valeurs de couple de la broche, l'amplitude de vibration de la broche, la température au point de coupe. Ces informations sont transmises à une Unité spéciale qui les envoie vers le directeur de commande numérique qui agit selon l'analyse des informations sur les conditions de coupe pour permettre une meilleure qualité de travail, une meilleure productivité et une plus grande sécurité.

La Figure 10, illustre le fonctionnement de la commande adaptative.

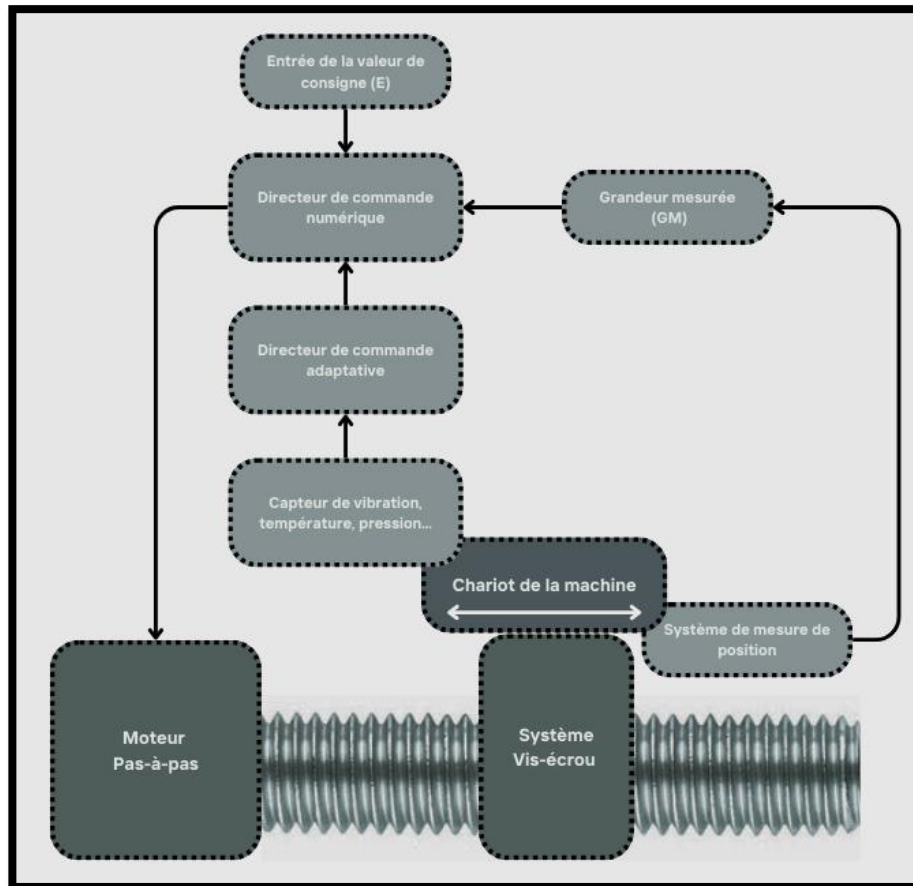


Figure 10 : Fonctionnement avec commande adaptative

### I.8.1.3 Fonctionnement en boucle fermé

En boucle fermée le système contrôle le déplacement ou la position jusqu'à égalité des Grandeurs entrée (E) dans le programme et celui mesuré (GM).comme illustre la Figure 11 :

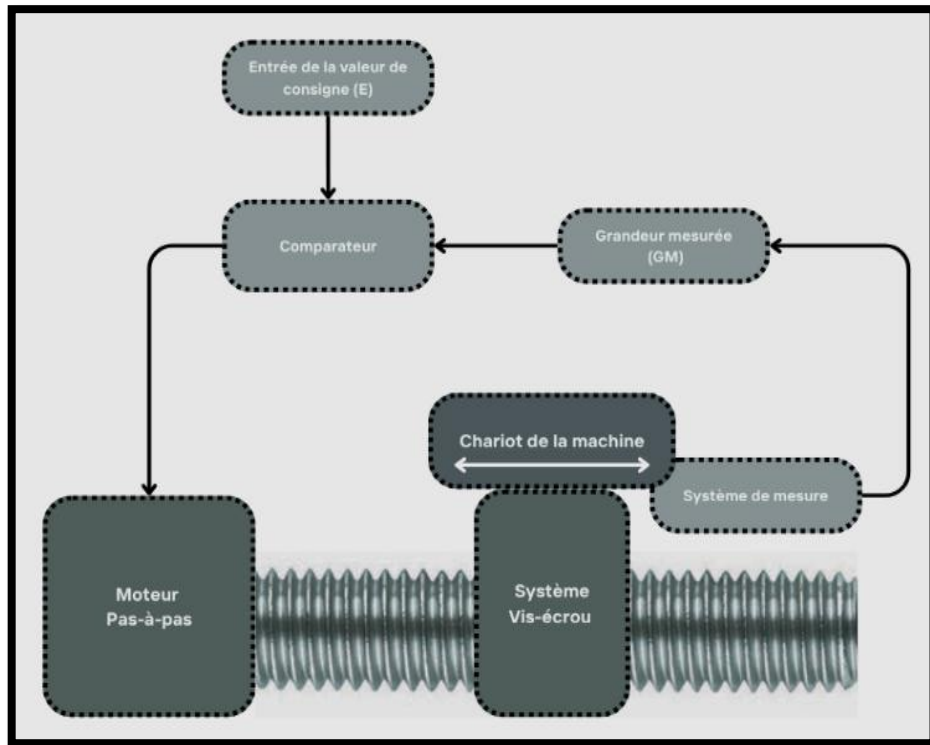


Figure 11 : Fonctionnement en boucle fermé

## I.8.2 Classification des MOCN selon le mode d'usinage

Selon le mode d'usinage on peut classer les MOCN en trois catégories : commande numérique point à point, commande numérique axiale ainsi que la commande numérique de contourage.

### I.8.2.1 Commande numérique point à point

C'est la mise en position de l'outil ou de la pièce, par déplacements non synchronisés. Le mouvement de coupe (usinage) n'est possible que lorsque le mouvement de positionnement.

Exemples d'opération d'usinage : perçage, alésage, lamage taraudage, petit fraisage.

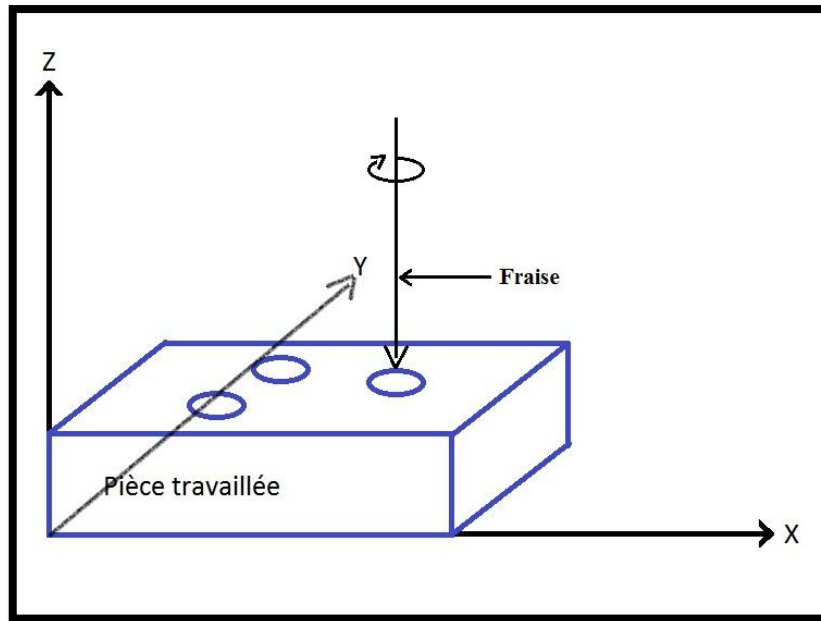


Figure 12 : Commande numérique point à point.

#### I.8.2.2 Commande numérique axiale

Ce sont des déplacements parallèles aux axes avec les vitesses d'avance programmée. Le mouvement de coupe et de positionnement sont synchronisés de façon à avoir un usinage Selon des trajectoires parallèles aux axes de déplacement.

Exemples d'opération d'usinage : tournage, fraisage, alésage.

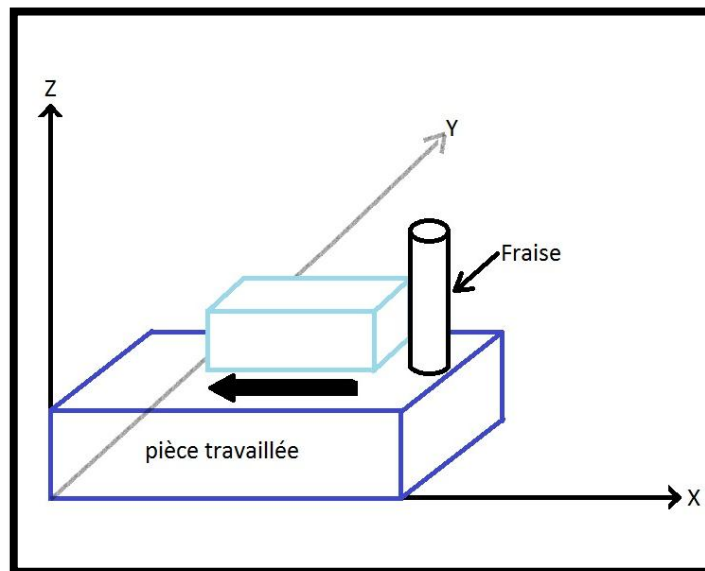


Figure 13 : Commande numérique par axiale.

#### I.8.2.3 Commande numérique de contournage

Ce sont des déplacements qui synchronisent de divers axes avec la vitesse d'avance programmée. Les trajectoires sont décomposées en éléments de droites ou de cercles dans un ou plusieurs plans.

Exemples d'opération d'usinage : toute opération possible sur un centre de tournage ou Centre d'usinage [6].

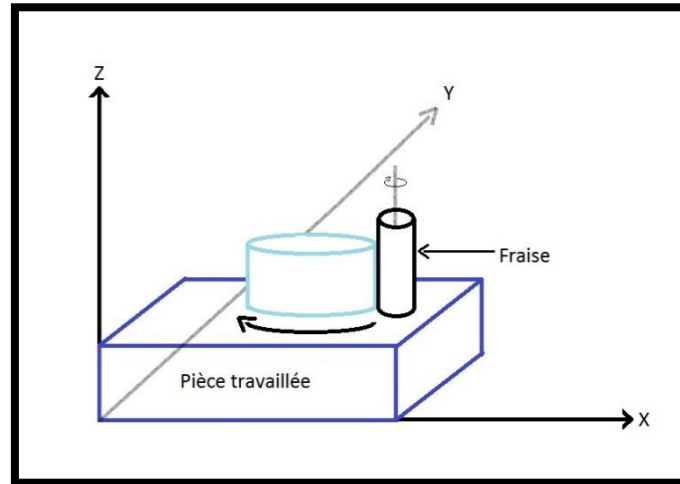


Figure 14 : Commande numérique de contournage.

### I.8.3 Classification des MOCN selon le nombre d'axe

Les possibilités de travail des MOCN s'expriment en nombre d'axes de travail.

Un axe définit toute direction principale suivant laquelle le mouvement relatif de l'outil et de la pièce a lieu lorsqu'un seul des moteurs de déplacement fonctionne avec contrôle numérique continu.

Un demi-axe définit la direction dans laquelle l'avance n'est pas contrôlable numériquement mais contrôlé par pistes, cames ou plateaux diviseurs.

## I.9 Domaine d'utilisation de MOCN

Les Machines CNC conviennent à la fabrication en petites et moyennes séries renouvelables. Elles permettent la réalisation, sans démontage, de pièces complexes comportant beaucoup d'opérations d'usinage. Elles se situent entre les machines conventionnelles très "flexibles" réservées aux travaux unitaires (prototypes, maintenance) et les machines transferts, très productives, réservées aux grandes séries. Les MOCN sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électroérosion, Jet d'eau) [7].

Les principaux procédés de fabrication sont concernés :

- Perçage, taraudage ;
- Tournage, alésage ;
- Fraisage ;
- Rectification ;
- Oxycoupage, soudure en continu, par points
- Poinçonnage, cisailage [8].

## I.10 Avantages et inconvénients de la MOCN

### I.10.1 Avantages de la CNC

- La machine CNC fournit une pièce avec une meilleure précision et une meilleure précision.

- Moins de travailleurs sont nécessaires, ce qui permet d'économiser les coûts de main-d'œuvre.
- La machine CNC peut produire des conceptions complexes avec une grande précision en un minimum de temps.
- La conversion de l'unité peut facilement être effectuée par cette machine (SI en unités britanniques ou de l'unité britannique au SI).
- Il contribue également à des raisons de sécurité.
- Faible maintenance requise.
- Réduit le temps de changement de configuration.
- La machine CNC a une production et une capacité plus élevées.
- Elle peut fonctionner 24 heures sur 24.
- Fiable.

### I.10.2 Inconvénients de la CNC

- Le coût des pièces et d'installation de la machine sont élevés.
- En cas de panne de la machine, un professionnel hautement qualifié est nécessaire pour résoudre le problème.
- Des connaissances en informatique sont nécessaires.
- Des connaissances en programmation sont requises.
- Dépendance aux fournisseurs de logiciels et de composants électroniques.
- Nécessité d'un entretien et d'un calibrage réguliers pour maintenir la précision.

## I.11 Conclusion

En conclusion, la Commande Numérique par Calculateur (CNC) représente une avancée majeure dans le domaine de la fabrication, apportant une précision, une répétabilité et une flexibilité exceptionnelles aux processus de production. À travers ce chapitre, nous avons retracé l'évolution historique de la CNC, clarifié ses principes de base et exploré en détail les différents types de machines et leurs classifications. L'utilisation de la CNC s'étend aujourd'hui à divers secteurs, témoignant de sa polyvalence et de son efficacité. Cependant, comme toute technologie, la CNC présente à la fois des avantages significatifs et des inconvénients qui doivent être pris en compte. En maîtrisant ces aspects, les industries peuvent maximiser les bénéfices tout en minimisant les défis, assurant ainsi une production optimale et de haute qualité.

---

***Chapitre II :***  
***Routeur 4 axes***

---

# Chapitre 2 : Routeur 4 axes

## II.1 Introduction

Les machines-outils à commande numérique à 4 axes sont des versions avancées des centres CNC à 3 axes qui ont révolutionné le domaine du façonnage des pièces. Avec l'installation du quatrième axe, ces machines de haute précision ont considérablement amélioré la qualité de l'usinage dans divers secteurs industriels. Comparées aux machines 3 axes, elles ajoutent un quatrième axe de rotation, permettant d'effectuer des opérations complexes telles que le fraisage, le tournage, le perçage et une plus grande flexibilité dans plusieurs opérations d'usinage et cela en effectuant plusieurs tâches simultanément. Ce quatrième axe offrant la possibilité de traiter des formes plus complexes, telles que les objets cylindriques ou asymétriques.

Ces machines 4 axes se différencient non seulement par leur utilisation spécifique mais aussi par la nature et la disposition de leurs axes. Il existe, par exemple, les fraiseuses  $(x,y,z,c)$  et  $(x,y,z,b)$ , les tours  $(x,y,z,a)$  et les tours à deux tourelles ou deux broches  $(2(x,z))$ . Les axes souvent désignés comme  $(X, Y, Z)$  étant des axes de mouvement linéaire (latéral, avant et arrière, vertical) et les axes  $(A, B, C)$  étant des axes de rotations qui tournent justement autour des axes  $X, Y,$  et  $Z$  respectivement. Les routeurs, quant à eux, sont souvent utilisés pour l'usinage de matériaux plus légers, avec une disposition d'axes adaptée aux pièces plates et tridimensionnelles.

Dans ce chapitre, nous examinerons plus en détail la structure et le fonctionnement du routeur CNC 4 axes étudié dans ce projet. Nous commencerons par une description des principales parties de la machine, telles que la table, le portique, et le mandrin. Ensuite, nous aborderons le processus de travail. Enfin, les domaines d'application, ainsi que les avantages et inconvénients de cette machine, seront discutés pour en illustrer l'importance dans l'industrie actuelle.

## II.2 Présentation du Routeur 4 axes

Le routeur CNC 4 axes que nous avons conçu se distingue par sa capacité à réaliser des opérations d'usinage complexes grâce à l'intégration d'un quatrième axe rotatif. Ce dernier est constitué d'un mandrin monté sur une table fixe, permettant le travail sur des pièces ayant une géométrie cylindrique ou des formes nécessitant un usinage sous différents angles.

### II.2.1 Parties de la machine

#### II.2.1.1 La table

La table de la CNC est la structure qui sert de support pour la pièce à usiner, pour le portique ainsi que pour le 4ème axe (mandrin amovible). Afin d'assurer les fonctions de service précédentes, la table doit contenir un système de guidage, des systèmes de transmission et de fixation ainsi que les composants de motorisation et d'usinage (moteur, la broche, outil...), qui seront traités dans les chapitres suivant. Le châssis sera fabriqué en tubes métalliques carrés soudés à l'arc afin de supporter les charges et d'assurer la rigidité tout en diminuant le poids et le cout.

#### II.2.1.2 Le portique

Le portique, élément central de la machine en forme de cadre, est une structure robuste qui se déplace le long de l'axe X, assurant ainsi la stabilité et la précision des opérations. Il supporte la tête d'usinage, qui se déplace sur les axes Y (horizontal) et Z (vertical), permettant ainsi d'effectuer des coupes précises sur l'ensemble de la surface de la pièce. Le portique est motorisé et souvent monté sur deux rails parallèles situés de part et d'autre de la table de travail pour garantir un mouvement fluide et contrôlé, essentiel pour les opérations d'usinage nécessitant une haute précision.

#### II.2.1.3 Le mandrin

Notre machine sera équipée d'un mandrin rotatif qui constitue le quatrième axe, souvent appelé axe A. Ce mandrin, faisant tourner la pièce autour de cet axe, est essentiel pour les opérations qui nécessitent un usinage sur plusieurs faces de la pièce sans repositionnement manuel. De plus, cette configuration est particulièrement avantageuse pour les travaux et les opérations nécessitant une manipulation circulaire ou axiale nécessitant une symétrie radiale, tels que l'usinage de colonnes, de formes cylindriques, hélicoïdales, ou pour graver des motifs autour d'un cylindre ou encore l'usinage de composants mécaniques à géométrie complexe. Ce système est également conçu pour être amovible, offrant ainsi une flexibilité dans l'utilisation de la machine.

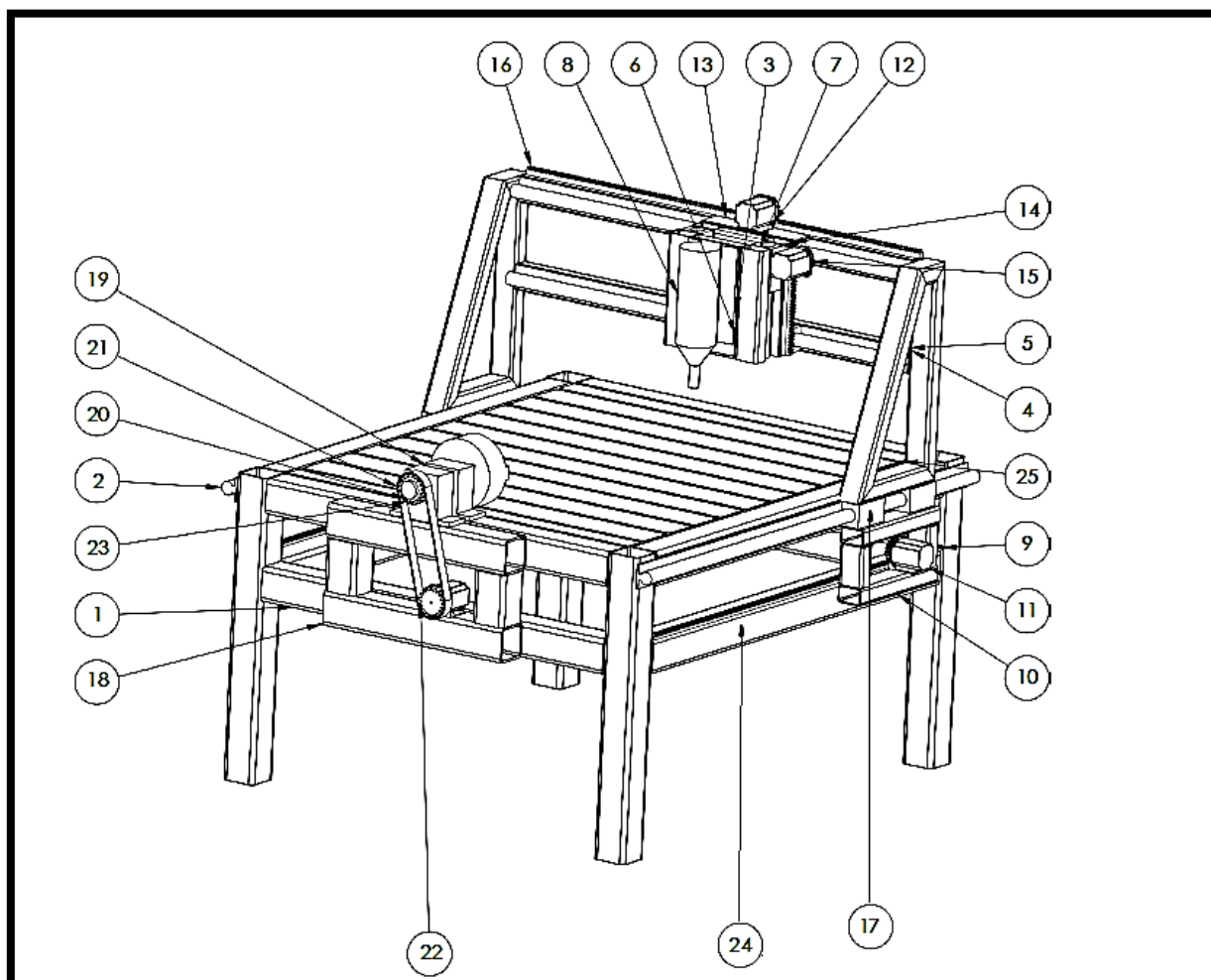


Figure 15: présentation des parties et composant de notre machine CNC 4 axe

| No. ARTICLE | NUMERO DE PIECE   | QTE |
|-------------|---|-----|
| 1           | table   | 1   |
| 2           | Rail axe x  | 2   |
| 3           | cage  | 10  |
| 4           | axe-y   | 1   |
| 5           | Rail axe y  | 2   |
| 6           | support_axe_z   | 2   |
| 7           | Rail axe z  | 2   |
| 8           | broche  | 1   |
| 9           | Crémaillère axe x<br>(2.5M<br>14.5PA 12FW 10PH<br>1120L---SAll) | 2   |

|    |   |   |
|----|---|---|
| 10 | Support pour l'axe x<br>(système de guidage et<br>moteur)       | 1 |
| 11 | support_moteur_2  | 2 |
| 12 | support_moteur  | 5 |
| 13 | moteur  | 5 |
| 14 | Support_moteur_y  | 1 |
| 15 | Pignon<br>(2.5M 18T 14.5PA<br>12FW --- S18N75H50L5N)            | 3 |
| 16 | pignon<br>(2.5M 18T 14.5PA<br>12FW --- S18N75H50L1N)            | 1 |
| 17 | douilles à billes   | 8 |
| 18 | support mandrin   | 1 |
| 19 | support mandrin 1   | 2 |
| 20 | mandrin   | 1 |
| 21 | poulie-mandrin<br>(3.5M 18T 14.5PA 25FW ---<br>S18A75H50L40.0N) | 1 |
| 22 | Poulie-Moteur<br>(3.5M 18T 14.5PA 25FW ---<br>S18A75H50L5.0N)   | 1 |
| 23 | Courroie1-1   | 1 |
| 24 | support table   | 4 |
| 25 | table usinage   | 1 |

Tableau 1 différents parties et pieces de la cnc 4 axes, légende figure15

## II.3 Principe de fonctionnement

Les machines CNC de base dotées de trois axes linéaires permettent de déplacer une broche en trois dimensions : X, Y et Z. En d'autres termes, l'outil de coupe peut se déplacer dans différentes directions, comme d'avant en arrière, d'un côté à l'autre et de haut en bas.

Un routeur CNC 4 axes (qui fait l'objet de cette étude) fonctionne selon un principe similaire à celui des routeurs CNC traditionnels à 3 axes, mais avec une dimension supplémentaire d'usinage : l'axe A qui est une rotation autour de l'axe X.

Cet axe qui rend la CNC sophistiquée est un mouvement rotatif plutôt qu'un mouvement linéaire qui peut simultanément faire tourner la pièce à usiner de manière synchrone avec les trois autres axes. Ainsi, plusieurs faces de la pièce peuvent être usinées. [9]

Le processus de travail d'un routeur CNC 4 axes se déroule en plusieurs étapes, de la conception initiale à la fabrication finale de la pièce. Ces étapes peuvent être représentées comme suit :

### II.3.1 Conception du modèle 3D

Le processus commence par la création d'un modèle numérique de la pièce à usiner avec un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) (Voir le chapitre I).

Le modèle 3D représente la pièce finale dans toutes ses dimensions, incluant les détails complexes qui nécessitent l'utilisation du quatrième axe. Il faut également s'assurer que le modèle 3D prenne en compte les limitations et les capacités du routeur CNC 4 axes, comme les dimensions maximales de la pièce, les tolérances, et les types de matériaux.

### II.3.2 Génération du G code

Le G code est un langage de programmation qui indique à la machine les mouvements à effectuer sur les différents axes. Une série d'instructions que le routeur CNC suivra pour usiner la pièce. Pour générer ce code le fichier du modèle 3D obtenu par le logiciel de CAO sous format approprié sera importé dans un logiciel de Fabrication assisté par ordinateur (FAO) ensuite l'interpréter en un système de mouvement et ainsi continuer l'usinage et le processus de fabrication. Le quatrième axe requiert une programmation supplémentaire, ce qui rend la préparation plus complexe. Peu de logiciels sont capables de transformer un modèle 2D ou 3D en instructions CNC pour des opérations à 4 axes bien coordonnées. Les machines modernes nécessitent donc une approche plus professionnelle, généralement assurée justement par le logiciel FAO avancé, allant au-delà des méthodes de codage traditionnelles [9].

Il existe une autre voie possible concernant le processus de travail de cette machine, celle qui sera d'ailleurs adoptée dans notre projet, où un autre type de logicielle qui se charge directement à interpréter le G code et contrôler le système de mouvement de la machine, puisque Il existe des logicielle CAO qui s'occupent en plus du dessin 3D de générer ce G code, L'avantage de cette option réside dans l'indépendance vis-à-vis des modules et des cartes électroniques compatibles uniquement avec le logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) choisi. De plus, cela nous offre un contrôle plus étendu et optimisé de la machine.

Avant de générer le G-code final, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le logiciel FAO passe d'abord par une simulation et définit les paramètres et les opérations d'usinage adéquates. Pour un routeur 4 axes, il faut également spécifier les mouvements de rotation sur l'axe A, en tenant compte des angles de rotation pour chaque opération.

### II.3.3 Usinage

Il important de citer, avant d'entamer l'usinage, la phase de préparation de la machine qui implique le montage sécurisé de la pièce sur la table, souvent dans un mandrin pour le quatrième axe, et la sélection des outils appropriés pour l'usinage. De plus de cela, des réglages initiaux sont effectués, notamment la mise à zéro des axes X, Y, Z, et A, pour assurer une précision maximale lors de l'exécution du programme CNC.

Une fois la pièce fixée sur la table ou dans le mandrin, le programme CNC est lancé. La tête d'usinage se déplace selon les instructions du programme, tandis que le mandrin tourne la pièce pour permettre un usinage complet sur plusieurs faces.

Après l'usinage, la pièce est nettoyée, inspectée, et peut subir des opérations de post-traitement comme le polissage ou l'ajustement pour l'assemblage. Si elle fait partie d'un ensemble, elle est intégrée aux autres composants, suivie d'un contrôle de qualité. Enfin, toute la documentation de fabrication est archivée, et une analyse des performances peut être réalisée pour optimiser les futurs processus.

- Matériaux usinés avec cette machine :

Une machine CNC à 4 axes et selon l'outil d'usinage dont elle est équipée, peut usiner tous les matériaux qu'une machine à 3 axes peut traiter, et ajoute la possibilité d'usiner des pièces plus complexes nécessitant une rotation autour d'un 4ème axe. Cet axe supplémentaire offre plus de flexibilité et de contrôle au processus d'usinage. Voici quelques exemples de matériaux pouvant être usinés avec une machine CNC 4 axes :

- Bois : Tels que les bois durs, les bois tendres, le MDF et le contreplaqué.
- Plastiques : tels que le nylon, le polystyrène et le polypropylène.
- Métaux : tels que l'aluminium, le laiton, le cuivre, l'acier inoxydable et le titane.
- Composites : tels que la fibre de carbone, la fibre de verre et le Kevlar.
- Mousse : Comme la mousse de polystyrène et la mousse de polyuréthane.
- Céramiques : telles que la porcelaine, l'alumine et la zircone [10].

## II.4 Domaine d'application

Les machines CNC 4 axes ont des applications polyvalentes car elles peuvent gérer efficacement plusieurs exigences de conception complexes. Voici quelques scénarios typiques dans lesquels les machines 4 axes sont bénéfiques :

### **Usinage de coins pointus :**

Pour les pièces nécessitant des arêtes vives aux extrémités ou sur les côtés, le 4ème axe est particulièrement utile. En faisant pivoter la pièce selon un angle approprié, elle peut être fraisée efficacement. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour ajouter des fonctionnalités de bord aux pièces cylindriques.

La capacité de rotation du 4ème axe permet à la fois le tournage d'éléments cylindriques et le fraisage des bords simultanément, éliminant ainsi le besoin de basculer entre différentes machines.

### **Détails d'objets cylindriques :**

Le 4ème axe de ces machines est rotatif, permettant à la pièce de tourner de la même manière qu'un Tour CNC. Cette fonctionnalité permet des détails complexes sur des objets cylindriques avec un usinage CNC à 4 axes. De plus, la programmation de telles tâches est plus simple grâce aux capacités du 4ème axe.

### **Améliorer la capacité de production :**

Parfois, la conception d'une pièce ne nécessite pas spécifiquement un usinage CNC à quatre axes. Toutefois, l'objectif est d'augmenter la capacité de production, une machine à

quatre axes peut s'avérer très efficace. Ça permet de travailler sur plus de pièces simultanément, ce qui est particulièrement utile lorsqu'il s'agit de traiter un grand volume de petites pièces.

En effet, la configuration de chaque pièce individuellement peut prendre du temps et ralentir la production. Dans de tels cas, une machine CNC positionnelle à 4 axes équipée « d'un tombstone » est idéale ('un tombstone' est un type de support de pièce utilisé dans l'usinage à quatre axes qui permet d'effectuer plusieurs opérations sans avoir à réinitialiser après chaque opération. Cela revient aussi au fait que ses quatre côtés peuvent contenir de nombreuses pièces à usiner) [11].

En outre, les routeurs 4 axes sont particulièrement utiles dans les domaines de la sculpture, de la gravure, de l'usinage de pièces complexes en bois, en métal ou en plastique, ainsi que dans la fabrication de prototypes, d'objets artistiques, et de composants industriels nécessitant une grande précision. D'ailleurs, parmi les industries courantes qui utilisent des machines CNC à 4 axes on retrouve :

- Automobile.
- Secteur Médical.
- Aviation et aérospatiale.
- Pétrole et gaz.
- Electronique.
- Construction et Génie Civil [12].

## II.5 Avantages et inconvénients

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Polyvalence</li> <li>➤ Flexibilité, capacités améliorée et géométries diverses</li> <li>➤ Précision et cohérence</li> <li>➤ Moins de risque d'erreur humaine (le besoin d'intervention humaine est réduit, ce qui entraîne moins d'erreurs)</li> <li>➤ Simplifie le travail</li> <li>➤ Capacité de production plus élevée en plus dans un temps réduits</li> <li>➤ Plus économique</li> <li>➤ Prise en charge du fraisage et du tournage</li> <li>➤ Configurations réduites et changements d'outils</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Installation coûteuse</li> <li>➤ Compétences et expertises supérieures requises</li> <li>➤ Complexité de programmation et de configuration</li> <li>➤ Limité par certaines géométries [11].</li> </ul> |

Tableau 2 : avantage et inconvénients des CNC 4 axes

---

***Chapitre III :***  
***Technologie Utilisée***

---

# Chapitre 3 : technologie utilisée

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur les différentes technologies qui interviennent dans la conception et la réalisation d'une CNC 4 axes. Il est crucial de comprendre à la fois les aspects mécaniques et électriques qui sous-tendent le fonctionnement optimal de la machine. La première partie traite des éléments mécaniques tels que le système de guidage, la transmission et le châssis, tous essentiels pour garantir la précision des mouvements et la robustesse de la structure. La seconde partie aborde la partie électrique, comprenant l'alimentation, les composants de commande comme le Raspberry Pi, les moteurs pas-à-pas et leurs contrôleurs, et la broche d'usinage. Ces technologies, lorsqu'elles sont bien intégrées, assurent le fonctionnement coordonné et précis de la CNC, permettant une efficacité maximale dans les opérations d'usinage.

## III.2 Partie mécanique

Pour présenter les composants mécaniques du routeur CNC nous allons les répartir par des systèmes, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 les trois parties de la CNC comporte chacune d'elle :

- **Un système de guidage.**
- **Un système de transmission.**
- **Un châssis.**

### III.2.1 Le système de guidage

Un système de guidage est un ensemble de composants mécaniques qui permettent de diriger les mouvements des axes de la machine de manière précise et contrôlée (dans notre cas les deux axes X et Y). Il est crucial pour la performance d'une CNC puisque ça assure aussi la répétabilité et la stabilité des mouvements donc sans jeu ni déviation, ce qui est essentiel pour obtenir des pièces usinées avec une grande précision. Un bon système de guidage minimise les vibrations, l'usure des composants, et garantit une longue durée de vie de la machine.

Parmi tous les systèmes de guidage qui puisse exister que ce soit vendu par les multiples entreprises spécialisées ou même confectionner de manière artisanale on peut citer par exemple **les guide linéaires, roues de guidage, rainure en V** (avec rouleaux de guidage), et bien plus, il existe donc plusieurs solutions.

Le type et la taille du guide, la capacité de charge, l'environnement, la composition du matériau et les exigences de lubrification joueront un rôle crucial dans la détermination du type de guide, et pour avoir un montage rigide avec un frottement et jeu minimaux entre le chariot et le guide. Le système de guidage qui convient le plus à notre CNC est le système douille à bill linéaire et arbre de guidage.

#### III.2.1.1 Arbre de guidage

Les arbres de guidage sont des tiges cylindriques sur lesquelles les douilles à billes se déplacent. Ils servent de piste pour blocs de roulement (les douilles) et sont essentiels pour assurer un mouvement linéaire précis. Le rail lui-même peut être monté de deux manières : montage par les extrémités ou montage continu (c'est l'ensemble du support continu qui est attaché au cadre de la machine.) Ces supports sont généralement disponibles en tant que supports uniquement ou en tant qu'ensemble support-rail. Ce dernier est moins susceptible de fléchir ou de se déformer sous une charge importante, ce qui préserve la précision du mouvement.



Figure 16: Arbre de guidage

❖ **Avantages et inconvénients**

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ils offrent une grande rigidité, surtout s'ils sont fabriqués à partir de matériaux robustes comme l'acier trempé, ce qui contribue à la précision du mouvement.</li> <li>• simples à installer et peuvent être intégrés dans divers systèmes de manière modulaire.</li> <li>• Ils sont compatibles avec de nombreux types de roulements et systèmes de guidage, ce qui les rend polyvalents pour différentes applications.</li> <li>• Les arbres de guidage de haute qualité sont résistants à l'usure et peuvent supporter des charges importantes sur de longues distances de déplacement.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sous charge importante ils peuvent fléchir ou se déformer, ce qui affecte la précision. le montage continu (support-rail) est plus rigide.</li> <li>• En fonction des conditions d'utilisation, les arbres peuvent développer une usure localisée là où les douilles à billes se déplacent le plus souvent, ce qui peut entraîner une diminution de la précision au fil du temps.</li> <li>• Un mauvais alignement des arbres de guidage peut provoquer une usure excessive ou un blocage.</li> <li>• Les arbres de guidage de haute qualité, en particulier ceux avec des traitements de surface spéciaux pour améliorer la durabilité, peuvent être relativement coûteux.</li> </ul> |

Tableau 3: avantages et inconvénients des arbres de guidage

III.2.1.2 Douille à billes linéaire

Les blocs de roulements qui se déplacent le long des arbres de guidage sont des roulements linéaires cylindriques et contiennent plusieurs rangées de billes en recirculation. Leur utilité est de permettre un mouvement linéaire fluide et précis. Il existe deux types de blocs de roulements de base utilisés avec le rail rond : ouvert et fermé. Pour être compatible avec le « support-rail » choisit les douilles à bille doivent être ouvertes. D'autres parts, le type de

roulement devient un facteur clé lors du calcul des capacités de charge pour chacune des méthodes de montage.

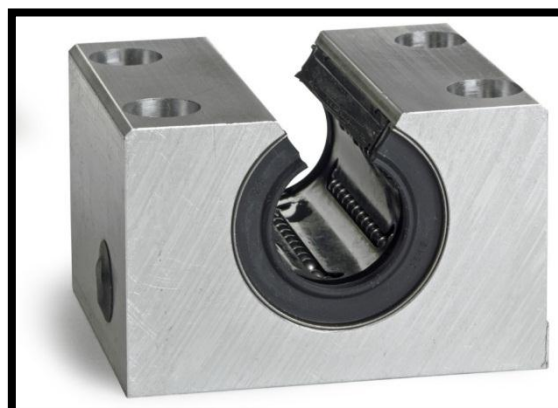


Figure 17 : douille à bille linéaire

#### ❖ Avantages et inconvénients

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grâce aux billes qui roulent à l'intérieur de la douille, la friction est réduite au minimum, permettant un mouvement fluide et efficace.</li> <li>• Les douilles à billes offrent un guidage linéaire précis.</li> <li>• Elles peuvent supporter des charges modérées à élevées, ce qui les rend adaptées à de nombreuses applications.</li> <li>• Bien que leur durabilité dépende du matériau et de la qualité de fabrication, les douilles à billes sont généralement robustes et peuvent durer longtemps avec un entretien approprié.</li> <li>• Les douilles à billes peuvent être remplacées facilement en cas d'usure, sans nécessiter le remplacement complet du système de guidage.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibles à la poussière, aux copeaux et autres contaminants qui peuvent entrer dans les roulements, ce qui peut augmenter la friction et l'usure.</li> <li>• Le mouvement des billes peut produire un certain bruit, surtout à des vitesses élevées, ce qui peut être un inconvénient dans des environnements où le silence est important.</li> <li>• Pour maintenir une faible friction et prolonger la durée de vie, une lubrification régulière est nécessaire. Un manque de lubrification peut entraîner une usure prématurée.</li> <li>• Les douilles à billes nécessitent des tolérances de montage précises pour fonctionner correctement. Une mauvaise installation peut entraîner un mauvais fonctionnement ou une usure accélérée.</li> </ul> |

Tableau 4: avantage et inconvénients douille à bille linéaire



Figure 18 : système de guidage -Arbre et douille à bille linéaire-

## III.2.2 Système de transmission

### III.2.2.3 Éléments de transmission

La transmission des différents mouvements de la machine-outil CNC peut se faire de plusieurs manières. On retrouve des transmissions par poulies et courroies, par chaînes et pignons, par pignons et crémaillères ou encore par vis (vis à bille ou vis trapézoïdale). Chaque mode de transmission a ses points forts et ses points faibles : la transmission par poulies courroies et chaînes pignons, convient plus aux machines dont la vitesse est un facteur important. Celle par vis est plutôt présente sur des machines dont la puissance et la précision sont les facteurs prédominants mais ne peut, cependant, pas être utilisée sur de longues distances, sur celles-ci on privilégiera plutôt la transmission par pignon et crémaillère [13].

#### III.2.2.4 Pignon et crémaillère

Les crémaillères sont utilisées pour convertir un mouvement rotatif en mouvement linéaire. Une crémaillère est une tige, généralement de section carrée ou ronde, avec des dents droites taillées sur une de ses surfaces. Elle fonctionne avec un pignon, qui est un engrenage cylindrique qui s'engrène avec la crémaillère. L'utilisation d'un système crémaillère-pignon est généralement la méthode de translation mécanique la plus populaire lorsque de longues distances sont nécessaires. Cela est principalement dû à des raisons de coût. La méthode de configuration de la combinaison crémaillère-pignon de notre CNC est de fixer la crémaillère à une partie stationnaire du châssis de la machine et à entraîner le pignon, qui est fixé à la partie mobile de la machine (les axes X, Y, Z du portique), au lieu que ça soit le pignon qui fait entraîner la crémaillère [14].

❖ **Avantages et inconvénients**

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convient pour des machines rapides.</li> <li>• Convient pour les grandes distances.</li> <li>• Réduction de Complexité pour de Grandes Dimensions</li> <li>• permettent des vitesses de déplacement élevées, ce qui peut améliorer la productivité de la CNC</li> <li>• La précision du système peut être ajustée</li> <li>• - à part pour des applications de Haute Précision et pour de grandes dimensions le coût et relativement faible</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• jeu (backlash) qui peut se produire entre le pignon et la crémaillère pouvant entraîner une perte de précision.</li> <li>• Les systèmes crémaillère-pignon peuvent générer plus de bruit par rapport à d'autres systèmes de transmission.</li> <li>• En cas d'arrêt d'alimentation des moteurs, seul le couple de détente statique de ces derniers s'oppose à un éventuel mouvement indésirable.</li> <li>• Usure des Dents</li> <li>• une lubrification régulière est nécessaire [15].</li> </ul> |

Tableau 5 : Avantages et inconvénients système pignon crémaillère

III.2.2.5 Courroie et poulie

Les courroies et les poulies permettent la transmission d'un mouvement de rotation d'un arbre menant à un arbre mené relativement éloignés l'un de l'autre. [SmainiDjamel\_BenKadiR.pdf]

Les poulies sont des roues circulaires avec une gorge sur leur périphérie, conçues pour accueillir une courroie un élément flexible (souvent en caoutchouc, polyuréthane ou un matériau composite) qui les entoure.

Le rapport des diamètres entre les poulies détermine la vitesse de rotation et le couple transmis. Le système augmentera ou diminuera le couple au détriment de la vitesse, selon si la poulie motrice est plus petite ou plus grande que la poulie réceptrice.



Figure 19: système de transmission - poulie-courroie-

❖ **Avantages et inconvénients**

| Avantages  | inconvénients  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible coût.</li> <li>• Convient pour des machines rapides.</li> <li>• facilité de mise en place.</li> <li>• flexibilité pour ajuster la vitesse et le couple</li> <li>• Absorption des Vibrations et Chocs (par les courroies en polyuréthane ou en caoutchouc) ce qui réduit l'usure mécanique et le risque de transmission des chocs aux composants et du moteur.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une précision relativement faible.</li> <li>• En cas d'arrêt d'alimentation des moteurs, seul le couple de détente statique de ces derniers s'oppose aux mouvements indésirables.</li> <li>• Possibilité de Glissement et donc perte de précision dans le positionnement du mandrin.</li> <li>• Est sujet à une perte d'efficacité en raison de l'usure des poulies et de la courroie ou la présence de saletés.</li> <li>• Est intolérant aux températures extrêmes qui affectent la souplesse de la courroie [15].</li> </ul> |

Tableau 6 avantages et inconvénients système courroie et poulie

III.2.2.6 Vis trapézoïdale et écrou :

Les vis trapézoïdales, également connues sous le nom de vis de puissance, sont utilisées dans la commande de mouvement pour traduire les mouvements de rotation en un mouvement linéaire. Ce sont des barres de métal avec un filetage, semblable à une vis traditionnelle. Les vis trapézoïdales tournent, provoquant le déplacement de l'écrou le long de la vis selon un mouvement linéaire.

Nous pouvons choisir parmi des assemblages d'écrous en plastique dans des conceptions anti-jeu ou super-écrou qui utilisent tous un acétal lubrifié à l'intérieur. Cela offre un excellent pouvoir lubrifiant et une excellente résistance à l'usure [16].

❖ **Avantages et inconvénients**

| Avantages   | Inconvénients   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix compétitifs.</li> <li>• Autobloquant (ne nécessite pas de système de freinage.)</li> <li>• Bien adapté aux applications verticales.</li> <li>• Configuration flexible.</li> <li>• Moins bruyant que les vis à billes.</li> <li>• Disponible dans des diamètres de vis aussi petits que 6 mm.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantité considérable de contrecoup.</li> <li>• Nécessite des écrous spéciaux pour réduire ou éliminer le jeu.</li> <li>• Nécessite un entretien régulier</li> </ul> |

Tableau 7: Avantages et inconvénients vis trapézoïdales



Figure 20 : Vis trapézoïdale et écrou

❖ **Accouplement flexible :**

En mécanique, un accouplement ou joint de transmission est un dispositif de liaison entre deux arbres en rotation, permettant la transmission du couple.

Il permet éventuellement un certain désalignement (accouplement élastique, joint de cardan...), autorise des décalages angulaires (accouplement hydraulique...) et peut être temporairement inactif (embrayage, crabotage). Un accouplement mécanique peut être un accouplement

élastique, un accouplement à membranes, un accouplement à denture métallique ou encore un accouplement à soufflet.

Lorsqu'une vis à billes et un moteur pas-à-pas sont joints, le centre de leurs arbres doit être identique. Cependant, dans la pratique, cela est très difficile. Pour cette raison, un accouplement doit être conçu de manière à être insensible aux centres de rotation désalignés [17].



Figure 21: accouplement flexible

### III.2.3 Châssis

Le châssis des différentes parties de la machine sont fabriquées avec des tubes métalliques carrés. C'est une option intéressante, car ces tubes offrent une bonne combinaison de résistance, de rigidité et de facilité de fabrication où la légèreté et la résistance à la corrosion sont des préoccupations principales. Ces tubes seront assemblés par soudure puisque c'est recommandé pour une structure solide et durable. Pour la partie du mandrin où l'amovibilité est nécessaire, utiliser un assemblage par vis-écrous paraît être une solution adéquate.

Les avantages de ces tubes carrés (la rigidité, légèreté et résistance à la corrosion) revient au processus de leur fabrication qui consiste à dérouler et lisser une bande d'acier, la former en un tube rond, la souder en un tube carré, puis laminier et découper ce tube à la taille souhaitée. La résistance à la corrosion est obtenue en utilisant de l'acier de qualité avec des matériaux résistants à la corrosion et/ou en ajoutant une étape de traitements de surface comme la galvanisation.



Figure 22 tubes métallique carré

## III.3 Partie électrique

Les composants électriques utilisés dans ce projet :

### III.3.1 Alimentation à découpage

Une alimentation à découpage est une alimentation électrique dont la régulation est assurée par des composants électroniques de puissance utilisés en commutation, se distinguant des alimentations linéaires qui utilisent ses composants en mode linéaire.

Ce type d'alimentation a gagné en popularité depuis les années 1980 pour remédier aux inconvénients des alimentations linéaires, offrant un meilleur rendement et une masse réduite, et est désormais largement utilisé dans les appareils électroniques grand public.

#### III.3.1.1 Modèle (S-120-12)

Le modèle (S-120-12) d'alimentation à découpage fournit une puissance de 120W avec une sortie unique en courant continu de 12V et 10A. Il est conçu pour convertir une entrée en courant alternatif, compatible avec des tensions de 110V ou 220V, en courant continu de 12V. Cette alimentation à groupe unique est adaptée pour des applications nécessitant une régulation précise de la tension et un rendement élevé [18].



Figure 23: modèle de l'alimentation à découpage

### III.3.2 Raspberry Pi

Raspberry Pi a pour mission de mettre des plateformes informatiques polyvalentes, performantes et à faible coût entre les mains des passionnés et des ingénieurs du monde entier. Depuis 2012, l'entreprise conçoit des ordinateurs modulaires et à carte unique, basés sur l'architecture Arm et fonctionnant sous le système d'exploitation Linux. Que ce soit un enseignant cherchant à inspirer la prochaine génération de scientifiques en informatique, un passionné en quête d'inspiration pour un projet, ou un fabricant d'équipements cherchant une base solide pour de nouveaux produits intelligents, il existe un ordinateur Raspberry Pi adapté à chaque besoin[19].

Le Raspberry Pi est un nano-ordinateur monocarte à processeur ARM de la taille d'une carte de crédit pouvant se connecter à un moniteur, à un ensemble clavier/souris et disposant d'interfaces Wi-Fi, Bluetooth et Ethernet. Conçu par des professeurs du département informatique de l'université de Cambridge dans le cadre de la fondation Raspberry Pi.

Le Raspberry Pi fut créé afin de démocratiser l'accès aux ordinateurs et au « digital making » (terme anglophone désignant à la fois la capacité de résolution de problèmes et les compétences techniques et informatiques). Cette démocratisation est possible en raison du coût réduit du Raspberry Pi, mais aussi grâce aux logiciels libres. Le Raspberry Pi permet l'exécution, sur une carte micro-SD, de plusieurs variantes du système d'exploitation libre GNU/Linux, notamment Debian ou Ubuntu, ainsi que des logiciels compatibles. Il fonctionne également avec le système d'exploitation Microsoft Windows : Windows 10 IoT Core, Windows 10 on ARM (pour l'instant relativement instable), celui de Google Android Pi et même une version de l'OS/MVT d'IBM accompagnée du système APL\360.

Il est initialement fourni nu, c'est-à-dire la carte mère seule, sans boîtier, câble d'alimentation, clavier, souris ni écran, dans l'objectif de diminuer les coûts et de permettre l'utilisation de matériel de récupération. Néanmoins des « kits » regroupant le « tout en un » sont disponibles sur le web à partir de quelques dizaines d'euros seulement. Le Raspberry Pi est utilisé par des créateurs du monde entier car son prix le rend très attractif [20].

### III.3.2.1 Raspberry Pi Modèle 4 B

Parmi, toutes les versions et modèles existantes du Raspberry Pi, malgré pas la dernière version, le Pi Modèle 4 B reste une version améliorée des modèles précédents, offrant des performances accrues et des capacités élargies.

Le 24 juin 2019, la fondation Raspberry Pi annonce la sortie du Raspberry Pi 4 mais ce n'est qu'au 28 mai 2020 qu'une version à 8 Go de RAM est annoncée ainsi que la version 64 bits. Fonctionnant sur une distribution (de système d'exploitation) nommée Raspberry Pi OS au lieu de l'ancienne Raspbian (32 bits) évitant comme ça les confusions tout en étant identique en interface [20].

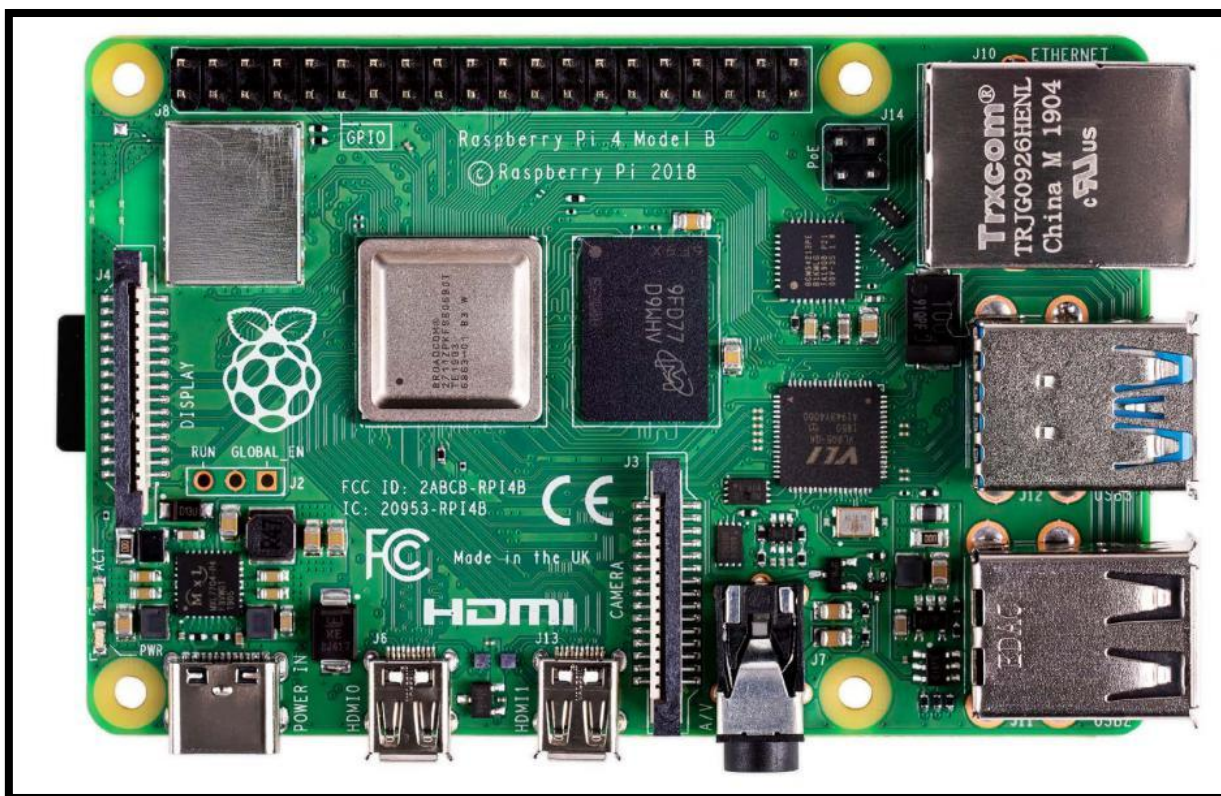


Figure 24: la carte Raspberry Pi Modèle 4 B

### III.3.2.2 Caractéristiques

Le Raspberry Pi 4 Model B est équipé d'un processeur quad-core 64 bits haute performance, d'un support double affichage avec des résolutions allant jusqu'à 4K via deux ports micro HDMI, d'un décodage matériel vidéo jusqu'à 4Kp60, jusqu'à 8 Go de RAM, d'une connectivité sans fil bi-bande 2,4/5,0 GHz, de Bluetooth 5.0, d'Ethernet Gigabit, de ports USB 3.0, et de la possibilité d'alimentation par Ethernet (PoE) via un module complémentaire PoE HAT séparé. Pour l'utilisateur final, le Raspberry Pi 4 Model B offre des performances de bureau comparables à celles des systèmes PC d'entrée de gamme x86.

Processeur ARM quad-core 64 bits avec une mémoire ram de 8 Go LPDDR4 une large possibilité de connexion

### III.3.2.3 Ses Spécification

- **Processeur** : Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64 bits SoC à 1,5 GHz
- **Mémoire** : 8 Go LPDDR4 avec ECC intégré
- **Connectivité** :
  - Réseau sans fil LAN 2,4 GHz et 5,0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac, Bluetooth 5.0, BLE
  - Ethernet Gigabit
  - 2 ports USB 3.0
  - 2 ports USB 2.0.
- **GPIO**: Connecteur GPIO standard à 40 broches.  
(entièrement compatible avec les cartes précédentes)

- **Vidéo & son:**
  - 2 ports micro HDMI (jusqu'à 4Kp60 pris en charge)
  - Port d'affichage MIPI DSI à 2 voies
  - Port caméra MIPI CSI à 2 voies
  - Port audio stéréo à 4 pôles et vidéo composite
- **Multimédia:**
  - H.265 (décodage 4Kp60);
  - H.264 (1080p60 décodage, encodage 1080p30);
  - OpenGL ES, graphismes 3.0
- **Support carte SD:** Emplacement pour carte Micro SD pour le système d'exploitation et le stockage des données
- **Alimentation:**
  - 5V DC via connecteur USB-C (minimum 3A)
  - 5V DC via GPIO header (minimum 3A1)  
(Une alimentation de bonne qualité de 2,5 A peut être utilisée si les périphériques USB connectés consomment moins de 500 mA au total.)
  - Alimentation par Ethernet (PoE) disponible (nécessite un module PoE HAT séparé)
- **Environnement:** Température de fonctionnement 0–50°C [21].

# RASPBERRY PI 4 MODEL B

**4 GPIO rétro-compatible**  
3.3 Volts, PWM indépendant de l'audio, 4 UART matériels (sans problèmes de fréquence dynamique d'horloge).

**WiFi 2.4 GHz, 5.0 GHz**  
**Bluetooth 5.0**  
avec antenne optimisée

**Broadcom 2711**  
28nm, 64-bits, **4 Coeurs Cortex A72 @ 1.5 Ghz**

**Carte micro SD**  
système d'exploitation et fichier utilisateur.

**Connecteur DSI**  
(écran officiel, inchangé)

**Conception orientée refroidissement**  
Cooling design: identique Pi3B+, utilisation du cuivre des pistes pour d'évacuer la chaleur du SoC.

**Alimentation USB Type C**  
(5V 3A)

**VideoCore VI**  
évolution de VideoCode V, support de:  
H.265 (4kp60), H.264 (1080p60)  
H.264 encoding (1080p30)  
OpenGL ES 1.1, 2.0, 3.0

**2x micro HDMI**  
1x HDMI 4Kp60  
ou  
2x HDMI 4Kp30

**Connecteur Camera Pi**  
(inchangé)

**Connecteur micro HDMI 2.0**  
(Au lieu du mini HDMI du Pi Zero)

**SDRAM**  
8 Go LPDDR4  
(avec ECC intégré)

**Bus PCIe**  
gen2 1x  
pour supporter le transfert Eth et USB

**PoE HAT Ready**

**Gigabit Ethernet Phy**  
bcm54213  
Testé à 900 Mb/s

**Super Speed USB 3.0**  
Host Controller VIA VL805

**2x USB3.0**  
bootable pour l'OS.  
testé à 350 Mb/s

**2x USB2.0**  
USB3 downgrade pour raison technique

**Connecteur 4 pôles Audio / Vidéo**  
(audio maintenant avec alimentation isolée et utilisation de canaux PWM dédiés)

Figure 25: Caractéristique et Spécification de la RPI 4B

### III.3.2.4 Broches entrées-sorties (GPIO)

Le Raspberry Pi dispose des broches GPAO (General Purpose Input/Output, littéralement Entrée-sortie à usage général) qui permettent la connexion de cartes d'extension ou d'autres composants électroniques pour réaliser des montages [22].

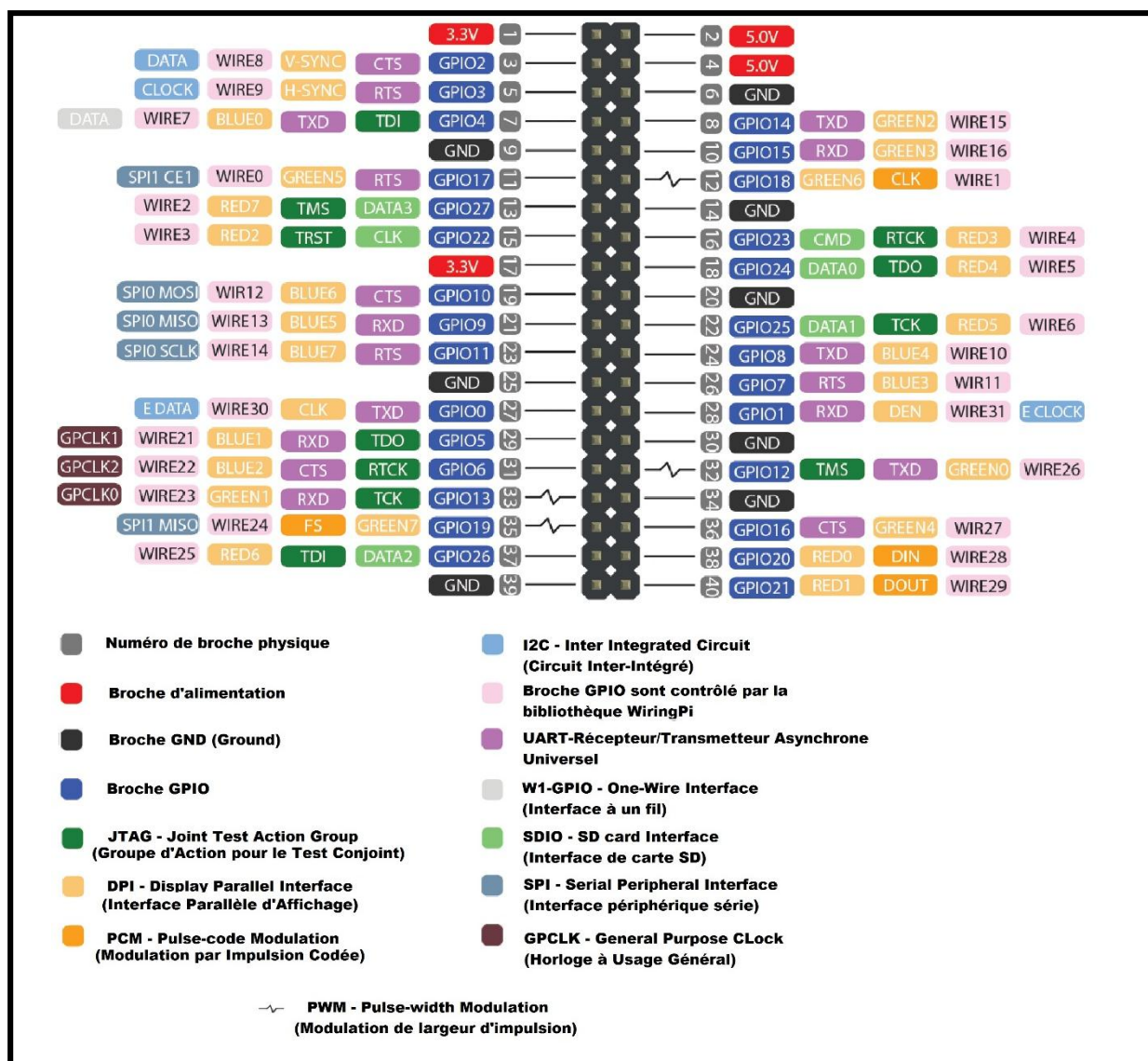


Figure 26: broche GPAO (General Purpose Input/Output du Raspberry Pi

## III.3.3 Moteur pas-à-pas

### III.3.3.1 Généralités et fonctionnement

Le moteur pas à pas est un moteur électrique DC (direct curent : à courant continu) sans balais, et comme tout actionneur électrique, il s'agit d'un dispositif électromécanique qui transforme l'énergie électrique en puissance mécanique. La particularité de ce dernier est sa capacité à se déplacer vers une position angulaire et de la maintenir sans avoir besoins de boucle d'asservissement car son mouvement de rotation est divisé en un nombre de pas égaux.

Ils possèdent des électroaimants qui sont rassemblés en groupes appelés phases, les enroulements d'une même phase sont alimentés ensemble. Ces derniers sont arrangés autour du rotor, qui peut être un aimant permanent, un corps ferromagnétiques en forme d'engrenage ou encore un aimant permanent en forme d'engrenage. À chaque fois qu'une phase est excitée le rotor est attiré et s'aligne avec elle, en l'éteignant et en alimentant une seconde, le rotor est une nouvelle fois attiré, ce déplacement représente un pas.

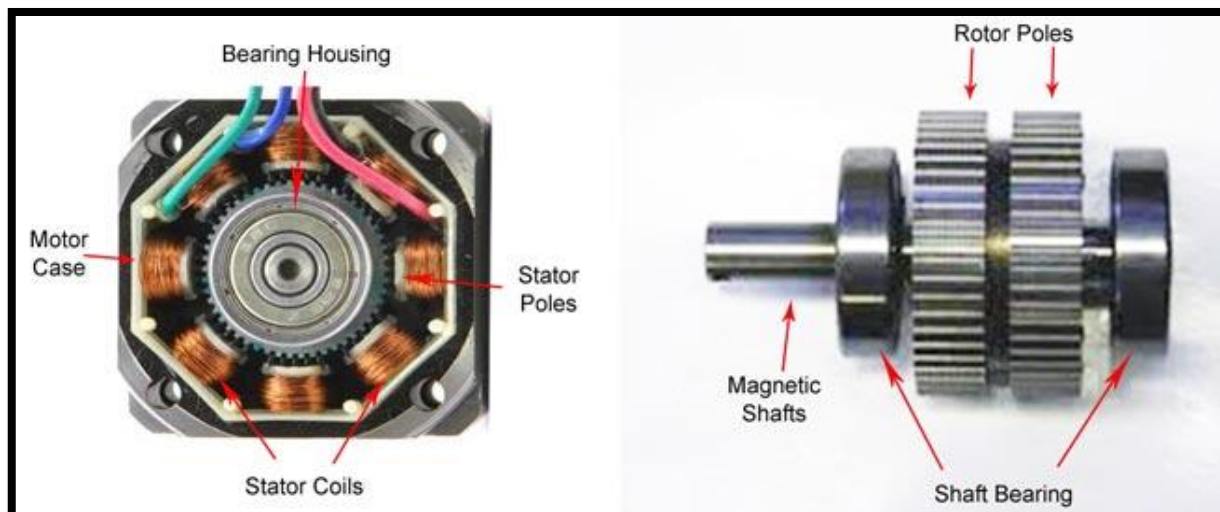


Figure 27 : Rotor et Stator d'un moteur pas-à-pas

### III.3.3.2 Types de moteurs

Il existe trois types de base de moteurs pas à pas :

- **Rotor réactif** : moteur pas à pas à réluctance variable (VR)
- **Rotor actif** : moteur pas à pas à aimant permanent (PM)
- **Combinaison de VR et PM** : moteur pas à pas hybride (HY)

#### ❖ Moteur pas à pas à réluctance variable (VR)

Les moteurs pas à pas à réluctance variable sont le type de moteur pas à pas le plus simple et sont constitués d'un rotor à plusieurs dents en fer doux et d'un stator bobiné. Les deux pôles sont magnétisés lorsqu'un courant continu est appliqué à l'enroulement du stator.

Lorsque les dents du rotor sont attirées vers les pôles du stator sous tension, une rotation se produit. Comme les aimants des moteurs pas à pas à réluctance variable sont plus petits et plus légers que ceux des moteurs pas à pas à aimants permanents, ils sont plus rapides. Plus la zone entre les engrenages du rotor et du stator d'un moteur pas à pas à résistance variable est petite, plus la perte de force magnétique est faible.

Pour ce type de moteur pas à pas, bien que la structure soit simple et facile à contrôler, la résolution est faible et le couple est faible.

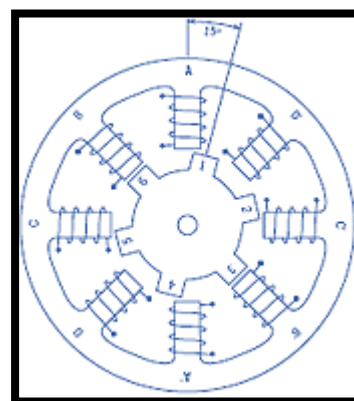


Figure 28: moteur pas à pas à réluctance variable

❖ **Moteur pas à pas à aimant permanent (PM)**

Des aimants permanents sont incorporés dans la structure du moteur pas à pas à aimant permanent. Le changement de position du rotor sera provoqué par un changement de sens du courant dans les bobines, modifiant les pôles magnétiques. Le rotor tournera de 90° lorsque la direction du courant est correctement modifiée. Ce pas unique du moteur, bien qu'utile dans certaines applications, serait très important et imprécis. Par conséquent, les moteurs à aimants permanents réellement existants ont plus de pôles de rotor et plusieurs aimants montés sur le rotor pour augmenter le nombre de pas et la précision de positionnement.

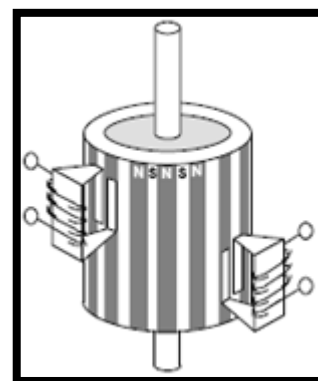


Figure 29: moteur pas-à-pas à aimants permanents

Les pôles de rotor magnétisés fournissent une plus grande force de flux magnétique, de sorte que les moteurs à aimants permanents présentent de meilleures caractéristiques de couple que les moteurs pas à pas à réluctance variable. La construction simple donne un moteur abordable avec une résolution assez faible.

❖ **Moteur pas à pas hybride (HY)**

Les moteurs pas à pas hybrides sont l'un des types de moteurs pas à pas les plus largement utilisés dans l'industrie. Les moteurs pas à pas hybrides combinent les meilleures caractéristiques des moteurs pas à pas à réluctance variable et à aimant permanent, ils sont donc plus chers. Les moteurs pas à pas hybrides offrent de meilleures performances en termes de résolution de pas, de couple et de vitesse.

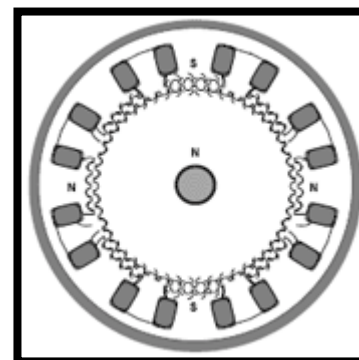


Figure 30 : moteur pas à pas hybrides

Le rotor d'un moteur pas à pas hybride est constitué d'aimants permanents, mais contrairement aux modèles évoqués ci-dessus (figures 28 et 29), les aimants ne sont pas montés radialement mais aimantés axialement. Normalement, le rotor est constitué de deux anneaux aimantés opposés placés sur l'arbre du moteur. Il a des rainures fendues dans chaque anneau pour former les dents du rotor [23].

III.3.3.3 Comparaison des trois types de moteur pas à pas

| Comparaisons            | Moteur pas à pas à réluctance variable (VR) | Moteur pas à pas à aimant permanent (PM) | Moteur pas à pas hybride (HY) |
|-------------------------|---|--|-------------------------------|
| Coût                    | Moyen                                       | Relativement bon marché                  | Relativement cher             |
| Structure de conception | Simple                                      | Moyen                                    | Relativement complexe         |

|                       |   |   |   |
|-----------------------|---|---|---|
| Résolution            | Angle de pas : 1,8°, 0,9° ou moins                                      | Angle de pas : 3°~30°   | Angle de pas : 1,8°, 0,9° ou moins                                      |
| Courbe couple-vitesse | Pas de chute de couple significative à haut régime                      | Couple important à bas régime, chute de couple importante à haut régime | Couple important à bas régime, chute de couple importante à haut régime |
| Bruit                 | Plus de bruit   | Moins de bruit  | Plus de bruit (mieux avec la subdivision en micro-pas)                  |
| Production de chaleur | Élévation élevée de la température (besoin d'un dissipateur de chaleur) | Faible montée en température  | Faible montée en température  |
| Subdivision micro-pas | Fonctionnent généralement en pas complet uniquement                     | Aimants ferrite ou néodyme-fer-bore                                     | Aimants néodyme-fer-bore  |
| Matériau du rotor     | Tôle d'acier au silicium (pas d'aimants permanents)                     | Pas complet, demi-pas, micro-pas  | Pas complet, demi-pas, micro-pas  |
| Surface du rotor      | Structure multi-dents sur la surface extérieure du rotor                | Lisse et sans dents   | Structure multi-dents sur la surface extérieure du rotor                |
| Couple magnétique     | Génère uniquement un couple attractif                                   | Couple à la fois attractif et répulsif pendant le fonctionnement        | Couple à la fois attractif et répulsif pendant le fonctionnement        |

Tableau 8 : comparaison des trois types de moteur pas-à-pas

#### III.3.3.4 Types de câblage

Une autre classification des moteurs pas à pas est basée sur le type d'enroulement du moteur biphasé. Les moteurs pas à pas sont classés en moteurs **unipolaires** et **bipolaires** en fonction de cette classification.

La principale différence est que les moteurs unipolaires fonctionnent avec une polarité de courant (tension), tandis que les moteurs bipolaires fonctionnent avec deux polarités, ce qui signifie que la direction du flux de courant dans les bobines est variable. Une autre différence est que les bobines du moteur doivent être connectées afin de transférer la puissance de la fin d'une bobine au début de l'autre. Cette méthode de connexion permet d'utiliser une polarité de

courant (tension). Un moteur bipolaire a un couple plus élevé qu'un moteur unipolaire, mais il est aussi plus compliqué à contrôler [23].

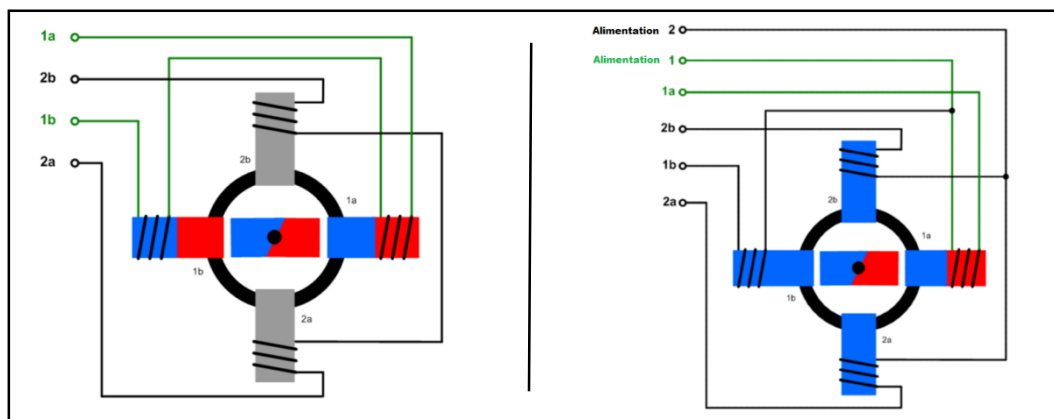


Figure 31 : Moteur pas à pas bipolaire et la connexion de ses enroulements (à gauche) / moteur pas à pas unipolaire et la connexion de ses enroulements (à droite.)

### ❖ Comparaison moteur bipolaire et unipolaire

| Moteur pas à pas bipolaire   | Moteur pas à pas unipolaire   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couple plus élevé</li> <li>• Ancrage plus élevé grâce aux enroulements</li> <li>• Plus petit</li> <li>• Moins cher</li> <li>• Contrôle plus compliqué, qui nécessite une carte comprenant des étages de contrôle de puissance et de balayage</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couple inférieur</li> <li>• Ancrage inférieur</li> <li>• Plus grande</li> <li>• Plus cher</li> <li>• Contrôle plus facile en ne nécessitant qu'un seul circuit d'alimentation à compléter</li> </ul> |

Tableau 9: comparaison moteurs unipolaires et bipolaire

### ❖ Caractéristiques couple et vitesse

#### - Couple d'arrêt ou couple de maintien :

C'est le couple maximum de rotation avec lequel on peut solliciter l'arbre d'un moteur pas à pas excité statiquement, sans qu'il ne se produise de modification de son angle de rotation.

#### - Plage de démarrage :

C'est la plage dans laquelle un moteur pas à pas peut être actionné en synchronisation avec la Fréquence de travail sans rampe d'accélération ou de décélération.

#### - Fréquence limite de démarrage :

C'est une fréquence maximale avec laquelle un moteur pas à pas ne peut démarrer à la charge indiquée.

#### - Plage d'accélération :

C'est la plage de travail dans laquelle un moteur pas à pas peut être actionné en synchronisation avec la fréquence de travail, sans qu'il ne se produise d'erreur de pas.

Il faut cependant qu'il soit actionné avec une rampe d'accélération et de décélération.

#### - Couple limite de travail ou d'entraînement :

C'est un couple de rotation maximale avec lequel on peut solliciter un arbre de rotation avant qu'il ne sorte de la cadence.

- **Fréquence maximale des pas :**

C'est une fréquence maximale admise avec laquelle un moteur pas à pas est actionné à vide sans perte de pas. Cependant, le moteur ne peut être démarré ou stoppé avec cette fréquence sans perte de pas [24].

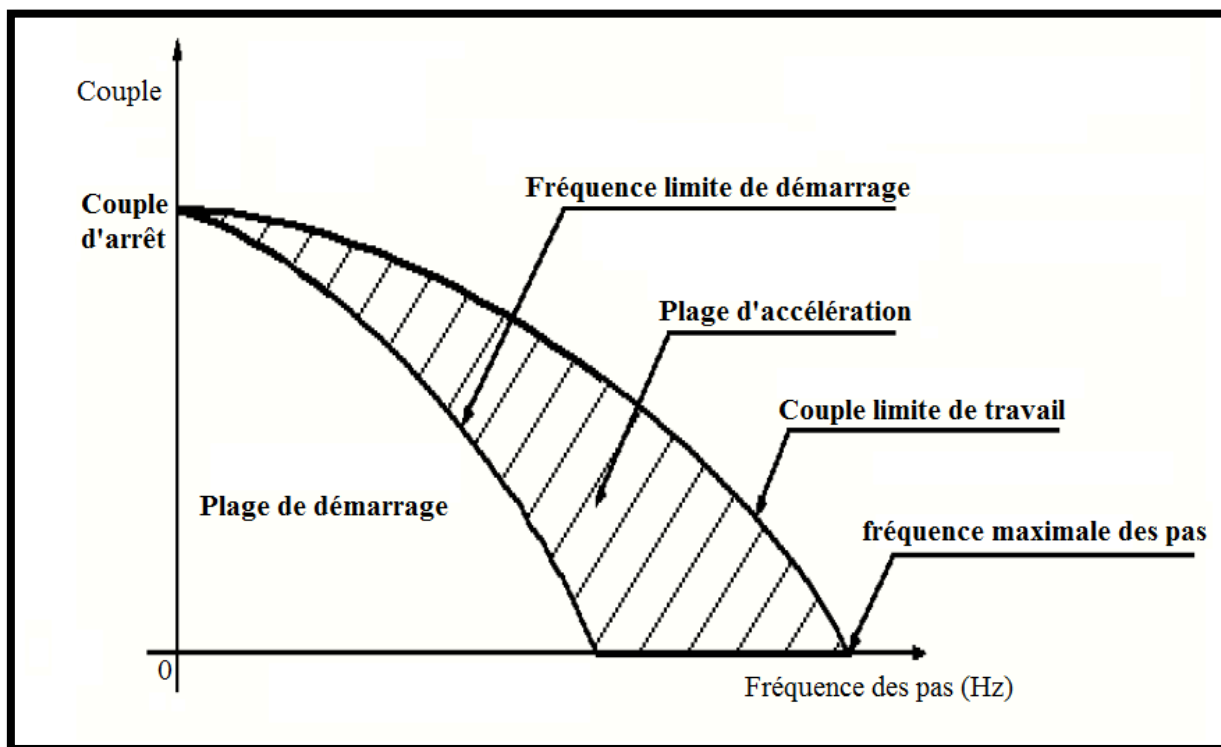


Figure 32 : Domaines de fonctionnement du moteur pas à pas

### III.3.3.5 Modes de commande

On a 4 modes de commande possibles :

#### ❖ Le mode 1 en pas entiers

Pour un moteur unipolaire, on alimente successivement chaque demi-enroulement. Pour un moteur bipolaire, on alimente un seul enroulement. On utilise ce mode à faible vitesse, et pour un couple faible.

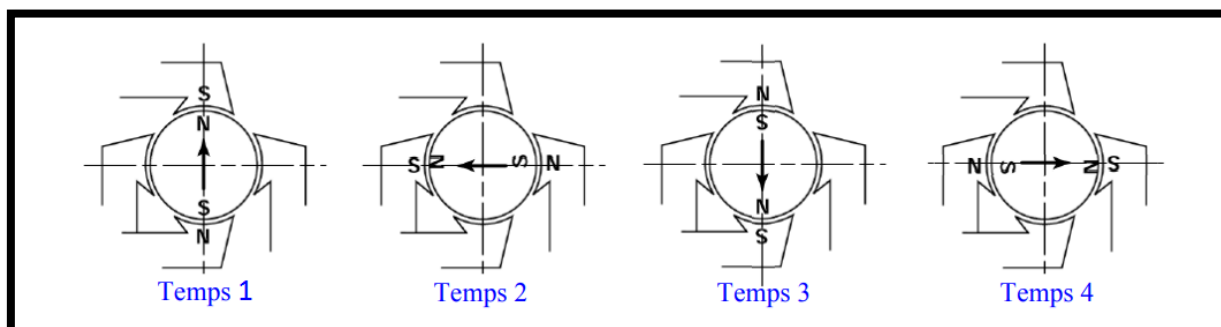


Figure 33: modes de commande, mode 1 en pas entiers

#### ❖ Le mode 2 en pas entiers

Pour un moteur unipolaire, on alimente successivement deux demi-enroulements. Pour un moteur bipolaire, on alimente deux enroulements. On utilise ce mode à forte vitesse, et pour un couple important.

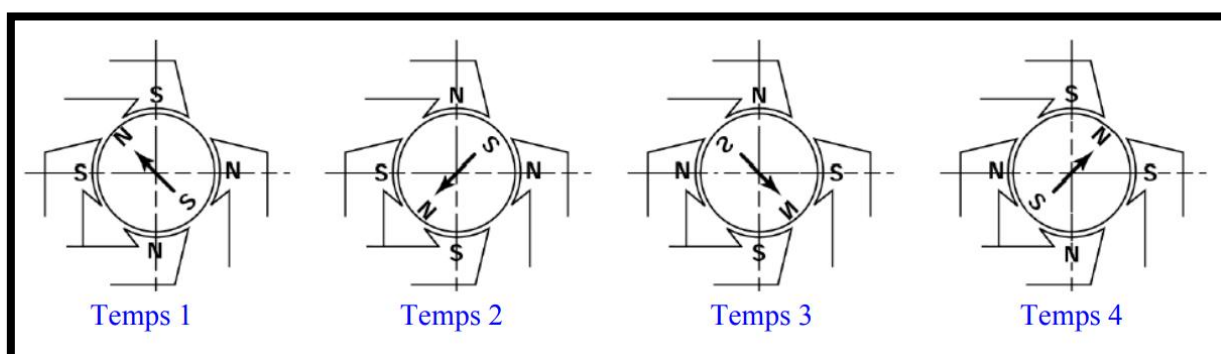


Figure 34: modes de commande, mode 2 en pas entiers

#### ❖ Le mode en demi-pas

En associant le mode 1 et le mode 2, on obtient un mode en demi-pas, cela permet de doubler la résolution du moteur. On utilise ce mode à forte précision, et pour un couple faible.

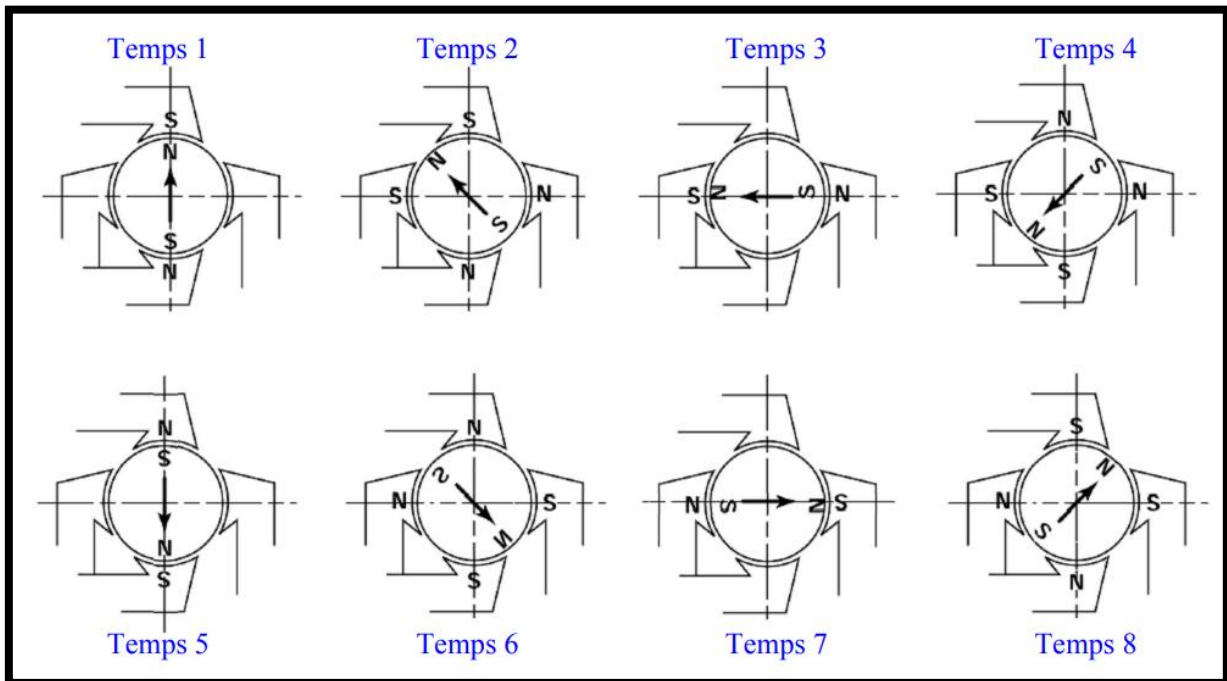


Figure 35 : modes de commande, mode demi-pas

#### ❖ Fonctionnement en micro-pas

Ce mode est surtout utilisé lors de déplacements de haute précision dans les machines à commande numériques pour des déplacements qui ont besoin d'être synchronisés. Il s'agit de commander les bobines en faisant varier les tensions de commande aux bornes de chaque bobine de façon à supprimer les saccades dues aux pas. Néanmoins, il est impossible d'arrêter le moteur entre deux demi-pas.

Pour ce fonctionnement, le circuit de puissance génère des courants variables dans les bobines durant chaque séquence. Le champ résultant est la composition des champs créés par les 2 bobines. En faisant varier par échelon le courant dans les bobines, on crée un champ résultant qui semble glisser d'un pas à un autre. La grandeur des pas est réduite. Les circuits pour micro-pas divisent les pas moteur jusqu'à 500 fois. Les courants dans les 2 bobines ressemblent à 2 courants alternatifs décalés de  $90^\circ$  [25].

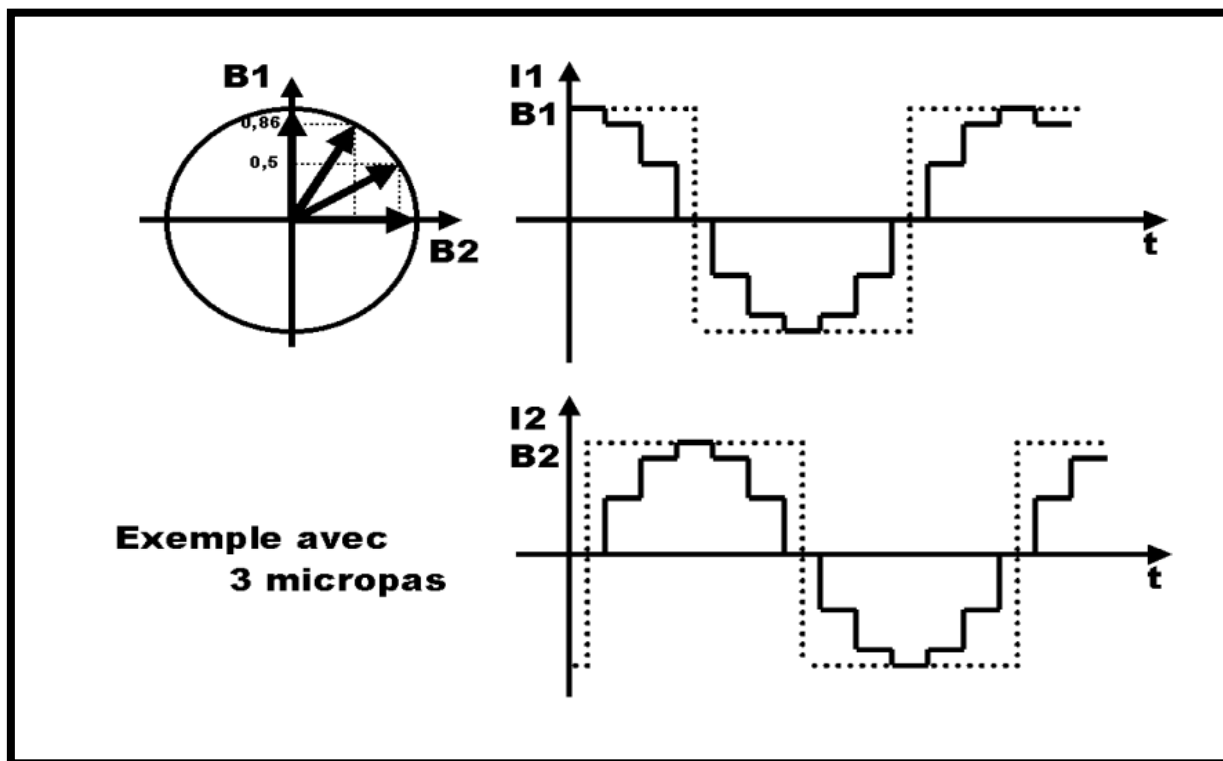


Figure 36 : modes de commande, mode micro-pas

Le nombre de pas complets par révolution peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$SPR = NR \times \emptyset \quad (\text{ou } NR = SPR/\emptyset)$$

Où :

- SPR = nombre de pas par tour
- NR = nombre total de dents du rotor (total pour les deux culasses)

$\emptyset$  = nombre de phases moteur.

### III.3.3.6 Domaines d'applications

Les domaines d'application du moteur pas à pas restent vastes, on peut les retrouver dans différents secteurs comme :

- La manufacture (machines-outils CNC, lignes de fabrication, armement).
- La santé (imagerie, assistants respiratoire, pompes péristaltique).
- La domotique (différents systèmes motorisés).
- Électronique grand public (imprimantes et scanners, appareils photos et leurs objectifs) [15].

### III.3.3.7 Avantages et inconvénients des moteurs pas à pas

|  |  |
|--|--|
| <b>Avantages des moteurs pas à pas :</b> | <b>Inconvénients des moteurs pas à pas</b> |
|--|--|

|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Positionnement</b> : En raison des moteurs pas à pas se déplaçant selon des étapes reproductibles précises, ils fonctionnent bien dans les applications qui nécessitent un positionnement précis.</li> <li>• <b>Contrôle de vitesse</b> : Des incréments de mouvement précis offrent un excellent contrôle de la vitesse.</li> <li>• <b>Couple à basse vitesse</b> : Les moteurs pas à pas ont un couple élevé à basse vitesse.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Faible efficacité</b> : Comparés aux moteurs à courant continu, ils consomment plus de courant. Par conséquent, ils ont tendance à chauffer.</li> <li>• <b>Couple limité à haute vitesse</b> : Le couple du moteur chute rapidement lorsque la vitesse diminue</li> <li>• <b>Pas de retour d'information</b> : Les commentaires ne sont pas utilisés pour spécifier les éventuelles étapes manquées</li> <li>• <b>Niveaux élevés de vibrations et de bruit</b> : A des vitesses très élevées, le fonctionnement de ce moteur n'est pas aisé.</li> <li>• <b>Possible perte de synchronisation</b> : Causés par des facteurs tels que des changements inattendus de charge</li> <li>• <b>Petit couple vers le rapport d'inertie</b></li> <li>• <b>Nécessite un circuit d'entraînement</b></li> </ul> <p>[<a href="https://www.omc-stepperonline.com/fr/support/quest-ce-qu-un-moteur-pas-a-pas">https://www.omc-stepperonline.com/fr/support/quest-ce-qu-un-moteur-pas-a-pas</a>]</p> |
|--|---|

Tableau 10 : Avantages et Inconvénients des moteurs pas à pas

### III.3.3.8 Moteur pas-à-pas NEMA 23

Ce modèle de moteur pas-à-pas, le NEMA 23 (JK57HS76-2804), de type de câblage bipolaire à quatre fils effectue 200 pas par révolution, soit un angle de 1,8 degré par pas. Il fonctionne sous une tension de 3 V et consomme 2800 mA par bobine. Le couple généré est de 19,0 kg\*cm (1,89 Nm). Ses dimensions sont de 56 x 56 x 76 mm. Ce moteur est adapté aux applications nécessitant une haute précision et un contrôle précis de la rotation [26].

#### ❖ Autre caractéristique

- Résolution : 200 pas/tour (1,8°)
- Tension nominale : 3 V
- Consommation de courant par bobine : 2,8 A
- Résistance de la bobine : 1,1 Ω
- Inductance de la bobine : 3,6 mH
- Couple de maintien : 19,0 kg\*cm (1,89 Nm)
- Sorties : bipolaire (quatre fils)
- Diamètre de l'arbre : 6,35 mm
- Poids : 1100 g
- Norme : NEMA 23
- Dimensions : 56 x 56 x 76 mm (sans l'arbre) [26].



Figure 37 : moteur pas-à-pas, NEMA 23

### III.3.4 Le Contrôleur TB6600

#### III.3.4.1 Caractéristiques et fonctionnement

Le TB6600 est un contrôleur de moteur pas à pas conçu pour piloter des moteurs bipolaires, capables de fournir jusqu'à 4,5 A par phase, ce qui le rend adapté à une grande variété d'applications [27].

Il prend en charge le microstepping (micro-pas), permettant d'améliorer la résolution et la fluidité du mouvement, avec des niveaux de micro-pas réglables (comme 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 pas) via des interrupteurs DIP intégrés, un boîtier électronique ajustable **manuellement** composé d'une série de minuscules interrupteurs, la combinaison de l'état de ces interrupteurs définit quel niveau de micro-pas sélectionné. Les interrupteurs DIP sont également utilisés pour ajuster le courant maximal que le contrôleur délivre au moteur pas à pas, dans certaines version, comme celle utiliser dans notre cnc, l'intensité du courant délivré est contrôlé avec un petit potentiomètre (résistance variable) au lieu des « DIP Switch » d'ailleurs dans cette version il en dispose que de 4. Néanmoins il faut savoir que la version sans potentiomètre avec 6 DIP switches est plus courante et souvent considérée comme la version standard du TB6600.

Le TB6600 fonctionne avec une tension d'alimentation allant de 9V à 42V DC, offrant une certaine flexibilité pour différentes configurations. Il intègre également des protections contre la surchauffe, la surcharge, et les courts-circuits, augmentant la fiabilité et la durabilité du contrôleur. Parmi d'autres options et avantage les plus importants :

- L'interface utilise une isolation par optocoupleur haute vitesse
- Mode automatique de demi-débit pour réduire la chaleur
- Dissipateur thermique de grande surface
- Capacité à résister aux interférences haute fréquence
- Protection contre l'inversion de polarité à l'entrée
- Protection contre la surchauffe, la surintensité et les courts-circuits

La majorité des contrôleurs disposent généralement d'un certain nombre de LED d'indication, et le contrôleur de moteur pas à pas **TB6600** en a trois que chacune, en fonction de son état (lorsqu'elle s'allume ou pas), a une signification particulière, liée au fonctionnement et à l'état du contrôleur. Voici ce qu'elles représentent :

- **PWR (Power) :**

Indique que le circuit ou le contrôleur est alimenté correctement.

- **RUN:**

Montre que le circuit ou le système est en fonctionnement, qu'il reçoit des commandes et fonctionne normalement.

- **ALARM:**

Alerte en cas d'erreur ou de dysfonctionnement (problèmes de surcharge, court-circuit, température excessive, etc.).

### III.3.4.2 Tableau de la configuration des interrupteurs DIP

#### ❖ Huit (8) types de contrôle du courant

| Courant (A) | S4  | S5  | S6  |
|-------------|-----|-----|-----|
| 0.5         | On  | On  | On  |
| 1           | Off | On  | On  |
| 1.5         | On  | Off | On  |
| 2           | Off | Off | On  |
| 2.5         | On  | On  | Off |
| 3           | Off | On  | Off |
| 3.5         | On  | Off | Off |
| 4           | Off | Off | Off |

Tableau 11 : Tableau de la configuration des interrupteurs DIP du contrôle de courant

#### ❖ Sept (7) types de micro-pas réglables

Le tableau suivant montre les paramètres de micro-pas du pilote TB6600. Les 3 premiers interrupteurs DIP sont utilisés pour régler les micro-pas .

$$\text{Angle de pas} = \text{Angle de pas du moteur} / \text{Micro-pas}$$

Par exemple, pour un moteur pas à pas avec un angle de pas de  $1,8^\circ$ , l'angle de pas final sous "Micro-pas 4" sera de  $1,8^\circ/4=0,45^\circ$ .

("Revolution" cela veut dire un **tour complet** ; NC signifie "Not Connected" ou "Non Connecté")

| Micro-pas | Pulse/Rev | S1  | S2  | S3  |
|-----------|-----------|-----|-----|-----|
| NC        | NC        | On  | On  | On  |
| 1         | 200       | On  | On  | Off |
| 2/A       | 400       | On  | Off | On  |
| 2/B       | 400       | On  | Off | Off |
| 4         | 800       | Off | On  | On  |
| 8         | 1600      | Off | On  | Off |
| 16        | 3200      | Off | Off | On  |
| NC        | NC        | Off | Off | Off |

Tableau 12 : Tableau de la configuration des interrupteurs DIP du contrôle du micro-pas

### III.3.4.3 Les entrées / sorties

Les sorties sont directement connectées aux enroulements du moteur pas à pas, tandis que les entrées de commande STEP, DIR, et EN permettent de recevoir les signaux de commande d'un microcontrôleur ou d'une carte CNC, contrôlant ainsi la vitesse, la direction, et l'activation du moteur :

- **EN** : La broche EN (Enable) est utilisée pour activer ou désactiver le contrôleur du moteur.

Lorsque la broche EN est activée (souvent en la connectant à la masse), le contrôleur est en marche et prêt à recevoir des signaux STEP et DIR pour contrôler le moteur. Lorsque la broche EN est désactivée (généralement en la laissant en l'air ou en l'appliquant à une tension positive), le contrôleur désactive les sorties vers le moteur, ce qui met le moteur dans un état d'inactivité (aucun couple appliqué).

- **DIR** : La broche **DIR** (direction) détermine le sens de rotation du moteur et cela par le niveau logique appliqué à la broche DIR.
  - Si la broche DIR est à un niveau logique haut (souvent 5V ou 3.3V, selon le système), le moteur tournera dans une direction (par exemple, dans le sens des aiguilles d'une montre).
  - Si la broche DIR est à un niveau logique bas (0V ou connecté à la masse), le moteur tournera dans la direction opposée (par exemple, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).
- **STEP** : L'entrée **STEP (ou PUL pour PULSE)** sert à recevoir les signaux d'impulsions qui contrôlent le mouvement du moteur pas à pas.
  - la vitesse de rotation : La fréquence des impulsions envoyées à l'entrée STEP détermine la vitesse de rotation du moteur. Plus la fréquence est élevée, plus le moteur tourne rapidement.

- distance totale parcourue : Le nombre total d'impulsions envoyées à l'entrée STEP détermine la distance totale parcourue par le moteur. Par exemple, pour un moteur avec 200 pas par révolution, il faut envoyer 200 impulsions pour une rotation complète si aucun microstepping n'est utilisé.

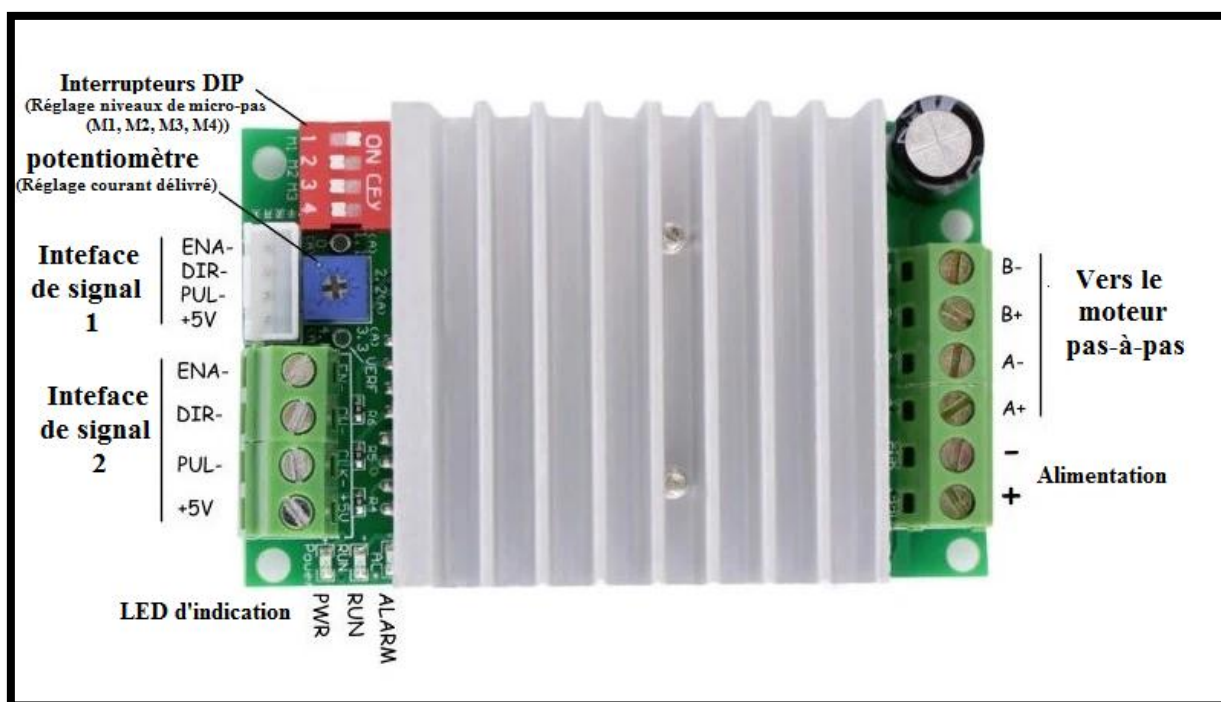


Figure 38 : différentes entres/sorties du TB6600, contrôleur de moteur pas à pas

### III.3.5 Broche d'usinage

La broche dans une MOCN est l'élément chargé de faire tourner l'outil de coupe à grande vitesse. C'est un composant essentiel qui permet de réaliser l'usinage en assurant la rotation de l'outil (fraise, foret, etc.) pour découper, percer ou graver le matériau.

La broche doit assurer une rotation à haute vitesse pour permettre à l'outil de couper efficacement les matériaux. Elle doit disposer d'une puissance suffisante pour s'adapter aux différents matériaux à usiner, comme le bois, le métal ou le plastique, tout en maintenant une grande stabilité pour garantir la précision de l'usinage. Ainsi, la broche détermine en grande

partie la capacité et les performances de la machine CNC. La broche est donc un élément central pour déterminer la capacité et la performance d'une machine CNC.



Figure 39: broche d'usinage

### III.3.5.1 Fonctionnement De La Broche Principale

Le moteur d'une broche CNC est le composant le plus important de l'appareil. L'application déterminera le type de moteur à utiliser. Par exemple, les machines bas de gamme peuvent utiliser des moteurs à courant continu sans balais, tandis que les machines haut de gamme peuvent avoir des moteurs refroidis par air ou par liquide. Les deux types de refroidissement sont courants pour les moteurs. Les moteurs utilisent un système d'entraînement, qui peut être soit une boucle ouverte, soit une boucle fermée.

Bien que les systèmes en boucle ouverte soient plus faciles à entretenir et moins coûteux à exploiter, les systèmes en boucle fermée tendent à produire des résultats plus précis. D'autre part, les systèmes à boucle fermée ont un coût initial plus élevé mais offrent un niveau de précision et de contrôle plus élevé. Le contrôle en boucle fermée est utilisé dans la majorité des machines CNC actuelles.

Pour que la machine fonctionne correctement, la broche principale doit être alignée sur l'axe de la machine. Différentes méthodes peuvent être utilisées, notamment des capteurs optiques, des LVDT et même des interféromètres laser.

### III.3.5.2 Types de broche

Les broches utilisées dans les CNC ont une variété de formes et de tailles. Dans cette partie, elles seront classées en fonction de différents paramètres :

❖ **Basé sur l'orientation de la broche**

- Broches verticales : L'outil de coupe est positionné verticalement, perpendiculaire à la table de travail, souvent utilisé dans les fraiseuses et les centres d'usinage.
- Broches horizontales : L'outil est positionné horizontalement, parallèle à la table, principalement utilisé dans les tours et aléseuses [28].

❖ **Basé sur le mécanisme de maintien d'outil**

- Broches à pince : Utilisent une pince pour maintenir l'outil, couramment utilisées dans les fraiseuses.
- Mandrins hydrauliques : Maintiennent l'outil avec pression hydraulique, offrant une grande précision.
- Porte-outils frettés : Utilisent la chaleur pour serrer l'outil avec une grande rigidité.
- Porte-outils Weldon : Maintiennent l'outil avec une vis, idéals pour l'enlèvement rapide de matière.
- Porte-outils HSK : Utilisent une interface conique pour une précision élevée dans l'usinage à grande vitesse [28].

❖ **Basé sur la puissance :**

- Broches entraînées par courroie : Système simple et abordable, adapté aux charges légères.
- Broches à entraînement direct : Connectent directement le moteur à la broche pour plus de précision et de couple.
- Axes de turbine à air : Utilisent de l'air comprimé pour des vitesses élevées et une faible vibration.
- Broches hybrides : Combinent différents systèmes pour un couple et une vitesse élevés.
- Broches à engrenages : Utilisent des engrenages pour fournir un couple élevé, adaptées aux matériaux durs [28].

### III.3.6 Capteur fin de course

Les interrupteurs de position mécanique ou capteur de fin de course coupent ou établissent un circuit lorsqu'ils sont actionnés par un mobile. Ils sont par exemple utilisés sur des applications de détection de fermeture ou d'ouverture de porte d'armoire électrique ou de carter de sécurité sur des machines. Il peut aussi être utilisé comme compteur pour dénombrer les objets passant à un certain point ou pour contrôler des machines dans le cadre d'un système de commande comme dans notre cas pour savoir si un axe arrive à une des deux limites.



Figure 40: capteur de fin de course

### III.3.7 Système d'affichage

Les systèmes d'affichage dans les machines à commande numérique (CNC) jouent un rôle essentiel en fournissant des informations visuelles et en facilitant l'interaction entre l'opérateur et la machine. Ces informations peuvent être des paramètres de fonctionnement de la machine en temps réel, des messages d'alarme en cas de problème et l'affichage des informations sur l'état général de la machine. En outre, l'affichage dispose d'une interface utilisateur intuitive permettant des ajustements manuels des paramètres directement via l'interface.

Ces systèmes sont donc essentiels pour assurer une gestion précise, rapide et sécurisée des opérations, tout en minimisant les erreurs et les temps d'arrêt.

#### III.3.7.1 Raspberry Pi Touch Display

Le Raspberry Pi Touch Display est conçu pour permettre la création de projets interactifs avec un Raspberry Pi, tels que des tablettes, des systèmes de divertissement ou des tableaux de bord d'information. Il est alimenté directement par le Raspberry Pi, éliminant ainsi le besoin d'une alimentation externe.

Le système d'exploitation Raspberry Pi OS intègre des pilotes pour écran tactile, prenant en charge jusqu'à dix points de contact ainsi qu'un clavier à l'écran, offrant ainsi une utilisation complète sans nécessité de connecter un clavier ou une souris.

La connexion de l'écran au Raspberry Pi s'effectue par l'intermédiaire d'une carte adaptatrice qui gère à la fois l'alimentation et la conversion des signaux. Deux connexions sont requises : l'alimentation via le port GPIO et un câble ruban relié au port DSI, à l'exception des modèles Raspberry Pi 400 et Raspberry Pi Zero [29].

#### ❖ Caractéristique de l'écran d'affichage

L'écran a une taille de 7 pouces en diagonale, avec une résolution de 800 x 480 pixels. La zone active mesure 154,08 mm x 85,92 mm, et il est équipé d'un panneau tactile capacitif multi-touch capable de reconnaître jusqu'à 10 points de contact simultanés [29].



Figure 41: Raspberry Pi Touch Display et ses composants

## III.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de passer en revue les principales technologies utilisées dans la conception de notre CNC 4 axes. La partie mécanique, avec ses composants de guidage et de transmission. La partie électrique, qui est composée de systèmes complexes, tels que l'alimentation, les moteurs pas-à-pas, et le contrôleur, qui garantissent une synchronisation parfaite et un contrôle précis des mouvements. En combinant ces deux volets technologiques, notre machine se dote des atouts nécessaires pour atteindre des performances optimales en termes de précision et de fiabilité. Cette intégration efficace est la clé de la réussite du projet et permet de répondre aux exigences des applications industrielles.

---

*Chapitre IV : Outils  
méthodologiques*

---

# Chapitre 4 : Outils méthodologiques

## IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les outils méthodologiques essentiels qui ont été utilisés pour la conception et la réalisation de la CNC 4 axes. Chaque outil joue un rôle spécifique dans le processus, que ce soit pour la modélisation 3D, la programmation des mouvements, ou la création de circuits électroniques.

Dans un premier temps, SOLIDWORKS est abordé, mettant en lumière ses capacités de conception assistée par ordinateur, qui permettent de créer des modèles précis et de simuler le comportement de la machine. Ensuite, PyCNC est examiné pour son rôle dans le contrôle de la CNC via le G-code, un langage fondamental pour les opérations d'usinage. Fritzing, quant à lui, est présenté comme un outil crucial pour la conception de circuits électroniques, facilitant la mise en œuvre de la partie électrique. Enfin, Raspberry Pi OS est discuté, soulignant son importance dans l'intégration des différents composants logiciels et matériels nécessaires au bon fonctionnement de la machine. Ces outils méthodologiques, combinés, forment la base du projet et contribuent à sa réussite.

## IV.2 Outils méthodologiques

### IV.2.1 SOLIDWORKS

#### IV.2.1.1 Généralités

Le logiciel de CAO SOLIDWORKS® est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. SolidWorks permet aux ingénieurs et concepteurs de créer des modèles paramétriques, de simuler des mouvements, de réaliser des analyses de contraintes, et de générer des dessins techniques.

Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers Concernés. Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.



Figure 42: logo du logiciel Solidworks

#### IV.2.1.2 Interface utilisateur Solidworks

SolidWorks offre une interface riche mais intuitive, conçue pour faciliter l'accès à un vaste éventail d'outils de modélisation, d'assemblage et de simulation. Comprendre cette interface est la première étape pour exploiter pleinement les capacités du logiciel. Dans cette partie, nous allons examiner de près les composants clés de l'interface utilisateur de SolidWorks, en mettant en lumière les menus principaux, la barre d'outils et le panneau de commande.

Au lancement de SolidWorks, l'utilisateur est accueilli par l'écran de démarrage qui offre des options pour ouvrir un nouveau document ou un document existant. Une fois qu'un document est ouvert ou créé, l'interface principale apparaît, composée de plusieurs éléments clés :

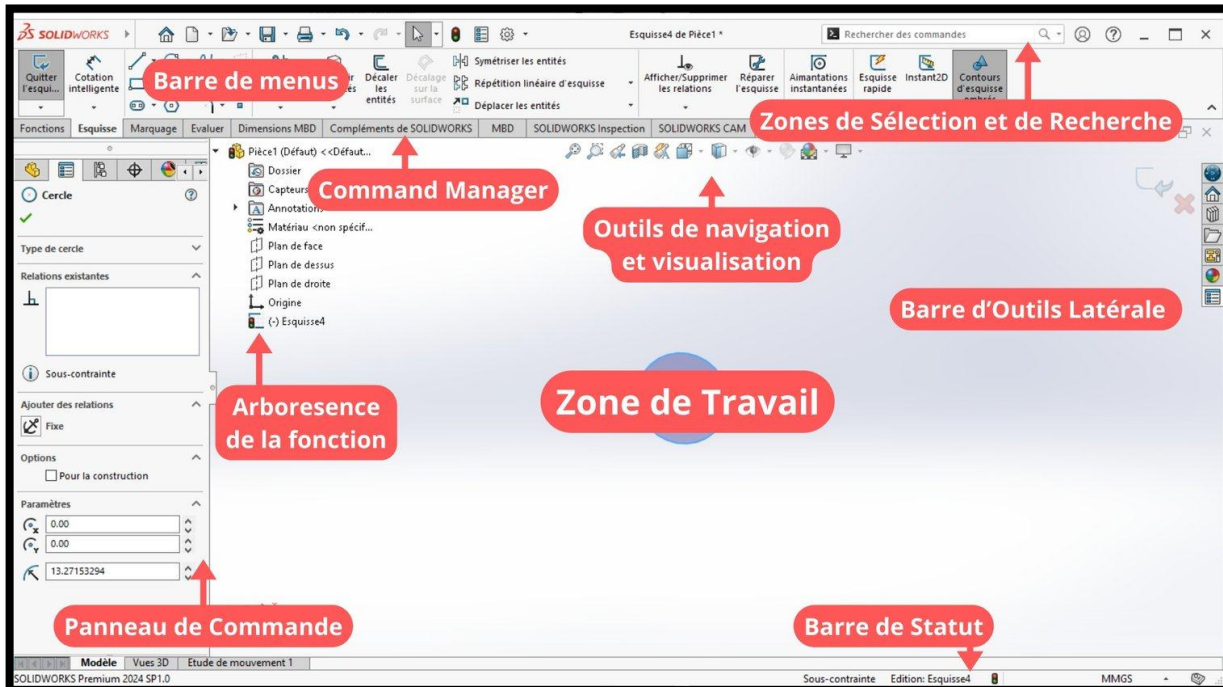


Figure 43: Element de l'interface principale

- **Barre de Menus en Haut :**

Cette zone contient des menus déroulants pour des actions comme le fichier, l'édition, l'affichage, les outils, et d'autres fonctionnalités avancées. Elle inclut également des options pour la gestion de l'esquisse et des fonctions spécifiques au logiciel.

- **Command Manager :**

Juste en dessous de la barre de menus, il y a une série d'onglets (par exemple, Fonctions, Esquisse, Marque, Évaluer) contenant des icônes pour des fonctions spécifiques. Ces onglets organisent les outils par catégorie pour faciliter l'accès aux fonctions de modélisation, d'esquisse, d'assemblage, etc.

- **Zone de Travail :**

La grande zone centrale de l'écran représente la zone graphique où l'esquisse, la pièce ou l'assemblage est visuellement manipulé. C'est ici que le modèle en cours de conception est affiché et peut être zoomé, pivoté, et modifié.

- **Arborescence de la Fonction à Gauche :**

Sur le côté gauche de l'écran se trouve l'arborescence de la fonction, qui liste tous les composants et caractéristiques de la pièce ou de l'assemblage en cours de création. Cela inclut les esquisses, les fonctionnalités, les plans de référence, et les annotations.

- **Barre d'Outils Latérale :**

À droite, il y a une barre d'outils verticale qui peut contenir divers onglets tels que le gestionnaire de propriétés, où c'est possible de modifier les caractéristiques de l'entité sélectionnée, comme le cercle dans ce cas.

- Barre de Statut :

En bas de l'écran, la barre de statut fournit des informations sur le document actif, les conseils d'utilisation et le système de coordonnées. Elle peut également inclure des outils pour ajuster l'affichage et le mode de visualisation.

- Panneau de Commande :

Lorsqu'on effectue une modification sur un modèle, un panneau de commande apparaît et propose des options pour ajuster les propriétés de la modification en cours. Des actions comme dimensionner le cercle, ajouter des relations, ou définir son emplacement par rapport à d'autres éléments du modèle y sont accessibles.

- Zones de Sélection et de Recherche :

En haut à droite, il y a des zones pour rechercher des commandes ou des fichiers, ainsi que pour accéder rapidement à certaines fonctions telles que les options de système ou les ressources d'aide [30].

## IV.2.2 PyCNC

### IV.2.2.1 Généralités

PyCNC est un interpréteur G-code open-source gratuit et un contrôleur de CNC/imprimante 3D haute performance. Il peut fonctionner sur une variété de cartes basées sur ARM alimentées par Linux, telles que Raspberry Pi, Odroid, Beaglebone et d'autres. Cela donne la flexibilité à l'utilisateur de choisir une carte avec laquelle il est le plus familier et d'utiliser tout ce que Linux a à offrir, tout en gardant tout l'environnement d'exécution G-code sur la même carte, sans avoir besoin d'un microcontrôleur séparé pour l'opération en temps réel.

Le choix du Python comme langage de programmation principal réduit considérablement la base de code par rapport aux projets en C/C++, diminue le code standard et spécifique au microcontrôleur, et rend le projet accessible à un public plus large pour des expérimentations.

Parmi les fonctionnalités les plus importantes de PyCNC, on retrouve la présence d'un dispositif « watchdog » (ou "chien de garde" en français) désignant un dispositif ou une fonctionnalité de surveillance du bon fonctionnement du système ou d'une application et s'assurer qu'il ne reste pas bloqué ou ne plante pas. PyCNC utilise un canal DMA (Direct Memory Access, littéralement en français : Access direct à la mémoire vive) comme *watchdog* matériel pour désactiver les broches GPIO en cas de blocage, afin de prévenir la surchauffe des composants dangereux comme le lit chauffant ou le chauffe-extrudeur. Toutefois, il est recommandé d'utiliser des protections matérielles, telles que des interrupteurs thermiques, car les protections logicielles peuvent aussi échouer [31].



Figure 44 Logo PyCNC

#### IV.2.2.2 Architecture du programme :

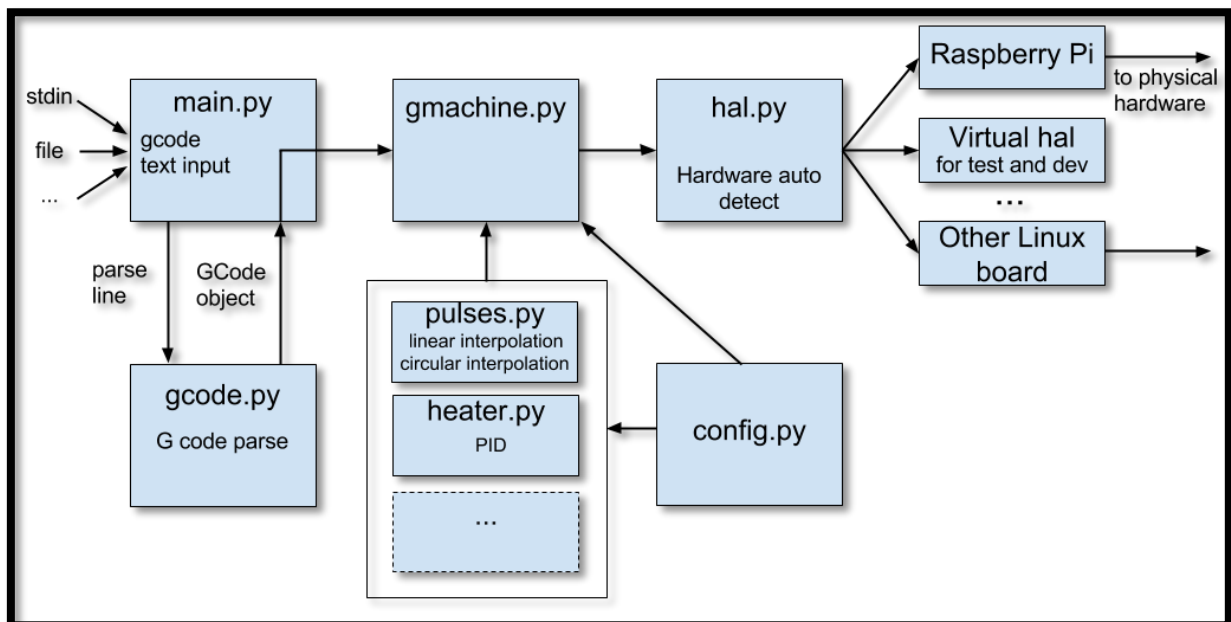


Figure 45 : Architecture du Programme PyCNC

#### IV.2.2.3 G-code

##### ❖ Définition G-code

À l'origine, les machines à bois et à métaux étaient actionnées manuellement et commandées par des manivelles. La force humaine a été lentement remplacée par la machine à vapeur puis par l'électricité, mais les machines sont restées contrôlées manuellement jusqu'au milieu du 20e siècle.

Dans les années 40, John T. Parsons a monté un servomoteur sur les manivelles pour les automatiser et a été l'un des pionniers de la commande numérique pour les machines-outils. Plus tard, dans les années 50, des ingénieurs du MIT ont développé un langage pour communiquer avec la machine. C'est ainsi que le G-code est né - un langage permettant d'envoyer des informations à une machine, de lui dire où aller, à quelle vitesse, ainsi que ce qu'elle doit faire en chemin. Il a aujourd'hui été accepté comme le langage universel pour le fraisage numérique [32].

### ❖ Définition post-processeur

Le post-processeur est l'étape finale au cours de laquelle le logiciel de FAO traduit les trajectoires d'outils conçues en G-code, que la fraiseuse CNC peut comprendre et lire pour effectuer des opérations telles que la coupe, le perçage ou le fraisage sur la pièce à usiner. En bref, le post-processing adapte la sortie générique du logiciel de FAO aux exigences et aux capacités spécifiques de la machine utilisée.

Etant donné le grand nombre de solutions FAO disponibles, chacune avec ses propres caractéristiques, Mekanika n'offre pas de post-processeur personnalisé pour chacune d'entre elles. Cependant, on pourrait toujours trouver un post-processeur qui génère un G-code lisible, même si certains compromis peuvent être nécessaires [32].

### ❖ Fonctionnement du G-code

Le G-Code est constitué de chaînes de lettres et de chiffres comme celle-ci, comprenant différentes classes de commandes machine :

```
N148 G1 Y1.12
N150 G3 X2.245 Y1.37 R.25
N152 G1 X.755
N154 G3 X.505 Y1.12 R.25
N156 G1 Y.63
N158 G3 X.755 Y.38 R.25
N160 G1 X2.245
N162 G3 X2.495 Y.63 R.25
N164 G1 Y.875
N166 G2 X2.745 Y1.125 R.25
N168 G1 X2.865
N170 Z.1 F6.42
N172 G0 X0. Y.125
N174 G1 Z-.0625
```

Figure 46: Un exemple d'une section de G-code

- Il existe différents types de codes :
  1. Les codes qui commencent par **G** sont des **fonctions de préparation**, qui indiquent une tâche spécifique à la machine telle que :
    - "Fais un trou"
    - "Fraise une ligne"
    - "Déplace-toi ici"
  2. Les codes qui commencent par **M** sont des **commandes machine** diverses. Elles sont généralement utilisées pour mettre en marche ou arrêter quelque chose, comme une broche ou un système de refroidissement.
  3. Les codes qui commencent par **D**, **H** ou **T** définissent les **outils** à utiliser et les **compensations** à utiliser avec cet outil.

4. Enfin, les codes qui commencent par **F** ou **S** définissent les vitesses de déplacement et de rotation de la machine. Littéralement "**Feed**" et "**Speed**".

Les différents codes du code G sont divisés en groupes. Une ligne de code G est composée de plusieurs fonctions, mais ne peut contenir qu'une seule action par groupe, afin d'éviter les erreurs. Par exemple, on ne peut pas demander à la machine de percer et de tarauder un trou en même temps. Pour découvrir les différents groupes de G-code et les paramètres de chaque fonction, il existe des tableaux de référence, comme celui de LinuxCNC [32].

### ❖ G-code et PyCNC

Prise en charge actuelle du G-code et des fonctionnalités sur PyCNC :

- Les commandes G0, G1, G2, G3, G4, G17, G18, G19, G20, G21, G28, G53, G90, G91, G92, M2, M3, M5, M30, M84, M104, M105, M106, M107, M109, M114, M140, M190 sont prises en charge. Les commandes peuvent être facilement ajoutées, on modifiant le fichier gmachine.py du programme.
- Quatre axes sont pris en charge : X, Y, Z, E.
- L'interpolation circulaire pour les plans XY, ZX, YZ est prise en charge.
- La broche avec contrôle du régime (rpm control) est prise en charge.
- Les extrudeuses et les plateaux chauffants (bed heaters) sont pris en charge.
- Surveillance du matériel (watchdog.) [31].

## IV.2.3 Fritzing :

### IV.2.3.1 Généralités

Fritzing est une initiative open source qui aide les concepteurs, les artistes, les chercheurs et les amateurs à passer du prototypage physique au produit réel. Ce logiciel est créé dans l'esprit de Processing et Arduino , en développant un outil qui permet aux utilisateurs de documenter leur Arduino et d'autres prototypes électroniques, et de créer une configuration de PCB pour la fabrication. Le site Web complémentaire aide les utilisateurs à partager et à discuter des ébauches et des expériences ainsi qu'à réduire les coûts de fabrication. Ce logiciel a été développé par : « Interaction Design Lab Potsdam » fonctionnant sur les Système d'exploitation : MacOS, type Unix, Microsoft Windows et Linux.

Fritzing est essentiellement un logiciel d'automatisation de la conception électronique avec une barrière d'entrée faible, adapté aux besoins des concepteurs et des artistes. Il utilise la métaphore de la plaque d'essai, de sorte qu'il est facile de transférer un croquis de matériel vers le logiciel. À partir de là, il est possible de créer des schémas de circuits imprimés pour les transformer en un circuit imprimé robuste par l'utilisateur ou avec l'aide d'un fabricant [33].



Figure 47 : Logo Fritzing

#### IV.2.3.2 Avantage de Fritzing

Les outils de prototypage physique ont beaucoup évolué et permettent déjà aux non-ingénieurs de transformer rapidement leurs idées en prototypes interactifs fonctionnels. Cependant, les prototypes à ce stade sont encore bruts et peu robustes. C'est là qu'intervient Fritzing : il permet au concepteur de passer à l'étape suivante et de créer un PCB fini d'un circuit individuel dans la forme souhaitée. Cela rend le circuit robuste et constitue la base d'une installation permanente ou même d'une production en série d'un projet [33].

### IV.2.4 Raspberry Pi OS

#### IV.2.4.1 Généralités

Raspberry Pi OS (anciennement nommé Raspbian) est un système d'exploitation libre et gratuit basé sur Debian optimisé pour fonctionner sur les différents Raspberry Pi.

#### IV.2.4.2 Caractéristiques

Il s'agit d'une modification de Debian spécifiquement adaptée pour les systèmes sur une puce de type ARM dotées d'une unité de calcul en virgule flottante (FPU, floating-point unit). Néanmoins une version pour les ordinateurs x86 est proposée sur le site officiel, nommée "Raspberry Pi Desktop (for PC and Mac)".

Jusqu'à la sortie du Raspberry Pi 4 8 Go en 2020, le système d'exploitation était Raspbian de Raspbian Project qui est un mot-valise formé par la fusion des mots « Raspberry Pi » et « Debian », La fondation Raspberry Pi a adopté Raspberry Pi OS pour lui succéder [34].

#### IV.2.4.3 Contenu

Étant donné les ressources limitées des nano-ordinateurs pour lesquels Raspberry Pi OS est principalement destiné, il intègre des logiciels réputés pour être légers et peu gourmands en ressources :

- L'environnement de bureau par défaut est PIXEL, acronyme de « Pi Improved Xwindows Environment Lightweight », « Environnement Xwindows amélioré et léger

pour PI », qui est composé d'un LXDE (un environnement de bureau) modifié et d'Openbox.

- Le navigateur web par défaut est Chromium

Raspberry Pi OS est fourni avec les environnements de programmation suivants :

- **BlueJ Java IDE** : environnement de programmation Java
- **Geany** : éditeur de texte léger avec fonctions de développement
- **Greenfoot Java IDE** : logiciel de développement d'applications et de jeux sous plateforme Java
- **Mathematica** : logiciel de calcul scientifiques
- **Node-RED (en)** : logiciel de programmation avec interface visuelle
- Python 2 et 3 (IDLE)
- **Scratch 1.0 et 2.0** : logiciels de programmation visuelle
- **Sense HAT Emulator** : simulateur 3D de la carte Sense HAT fait pour simuler des codes en Python
- **Sonic Pi** : logiciel permettant de créer des mélodies en Ruby.
- **Thonny (en) Python IDE** : environnement de programmation Python
- **Wolfram Mathematica** [34].

### IV.2.4.4 Interface graphique

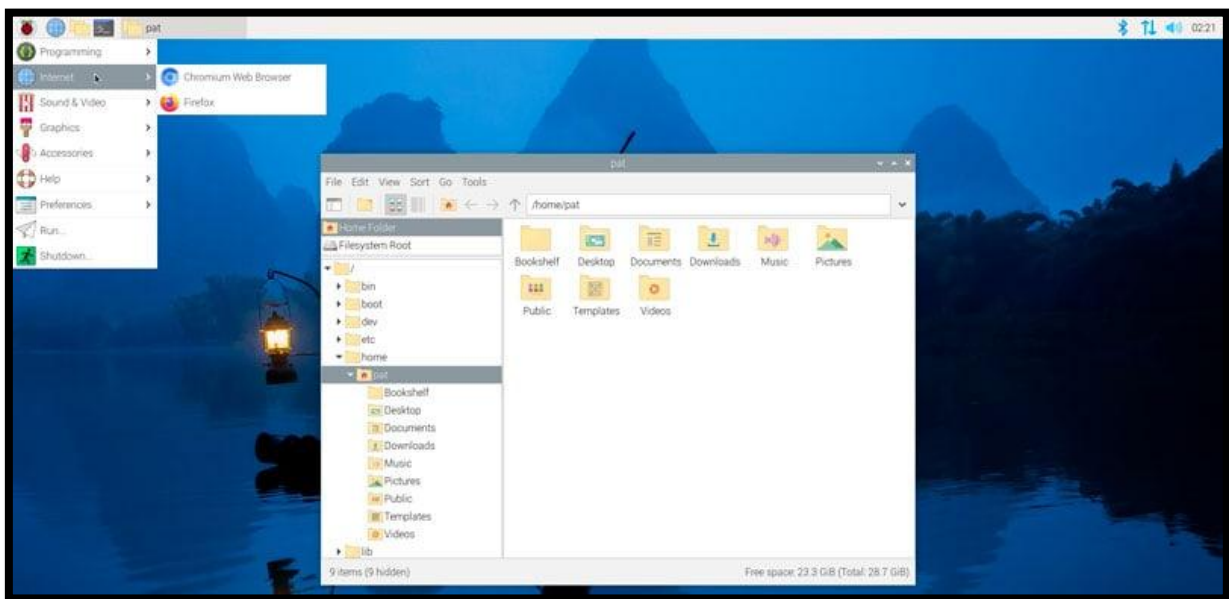


Figure 48 : interface graphique de la distribution Raspbian

### IV.3 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence l'importance des outils méthodologiques dans la conception et la réalisation de notre CNC 4 axes. SOLIDWORKS a permis une modélisation précise et une planification efficace, tandis que PyCNC a facilité la communication entre le logiciel et le matériel, permettant une exécution fluide des instructions. Fritzing a été un allié précieux dans la conception des circuits, garantissant l'intégrité et la fonctionnalité des connexions électriques. Enfin, l'utilisation de Raspberry Pi OS a permis d'orchestrer l'ensemble de ces éléments, créant une interface utilisateur intuitive et efficace. Ensemble, ces outils ont non seulement optimisé le processus de conception, mais ont également renforcé la fiabilité et les performances de la machine CNC, prouvant ainsi leur valeur dans le cadre de ce projet.

---

*Chapitre V :*  
*Réalisation*

---

# Chapitre 5 : Réalisation

## V.1 Introduction

Ce chapitre présente les étapes de réalisation de la CNC 4 axes, en se concentrant sur les parties électrique, mécanique et de commande. La première section aborde la conception du circuit électrique, une étape cruciale qui garantit le bon fonctionnement de la machine. La simulation du circuit, qui inclut la mesure des tensions et des courants ainsi que la vérification des erreurs, est également détaillée pour démontrer la validité des choix effectués. Ensuite, la partie mécanique est explorée, mettant en avant la conception des pièces essentielles telles que la table, le portique et le mandrin. Ces éléments mécaniques sont vitaux pour assurer la précision et la robustesse de l'ensemble. Enfin, le chapitre aborde la partie commande, notamment l'installation d'un système d'exploitation sur le Raspberry Pi et la configuration du programme PyCNC, qui permettront de piloter efficacement la machine. Ce processus de réalisation est une étape déterminante, alliant théorie et pratique pour donner vie au projet.

## V.2 Partie électrique

### V.2.1 Conception du circuit de la machine

Dans un premier temps nous avons dessiné le circuit en utilisant le logiciel Fritzing, pour cela il a fallu ajouter les bibliothèques des composants utilisés (comme les contrôleurs, capteur fin de course, l'alimentation...)

Composant utilisé :

| Composant                  | Quantité |
|----------------------------|----------|
| Raspberry Pi 4 Model B     | 1        |
| Raspberry Pi Touch Display | 1        |
| Moteur pas-à-pas (Nema 23) | 5        |
| Contrôleur (TB6600)        | 5        |
| Circuit inverseur logique  | 1        |
| Broche                     | 1        |
| Circuit pont en H          | 1        |
| Capteur de fin de course   | 6        |
| Alimentation à découpage   | 1        |

*Tableau 13: composants du circuit de la machine et leurs quantités*

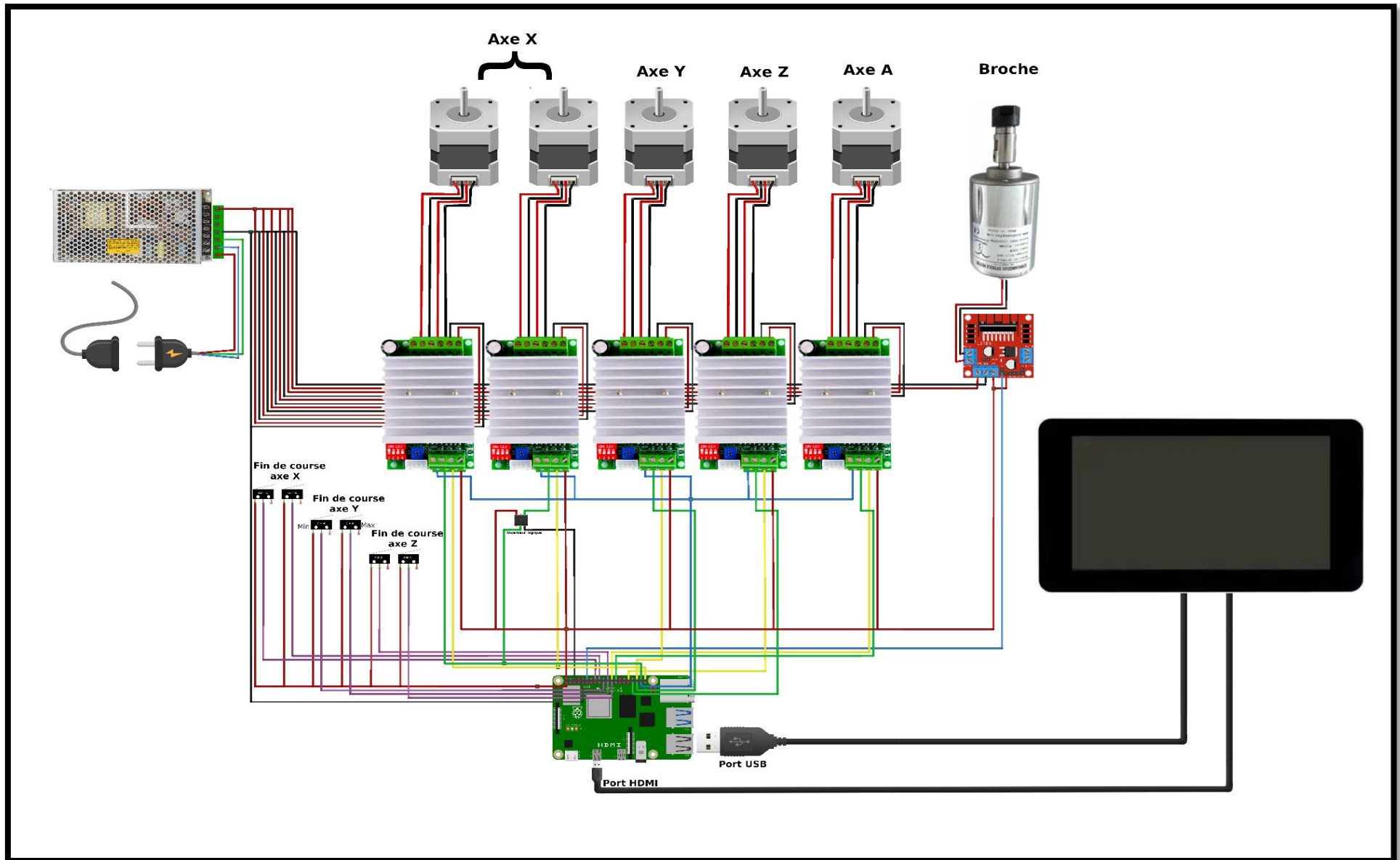


Figure 49 : circuit électrique complet de la CNC 4 axes

## V.2.2 Simulation du circuit

Les capacités actuelles du logiciel Fritzing sont très limitées (uniquement l'analyse des circuits CC). Cependant, il est entièrement fonctionnel, facile à utiliser et fonctionne sur la maquette et la vue schématique. De plus, il effectue certaines vérifications pour voir si des pièces fonctionnent en dehors de leurs spécifications.

### ❖ Mesure des tensions et des courants

Pour commencer la mesure un multimètre doit être connecté pour mesurer une tension. Lorsque le bouton de simulation est appuyé, le multimètre affiche la tension. Si la tension est modifiée nous observerons comment l'affichage du multimètre met à jour la tension.

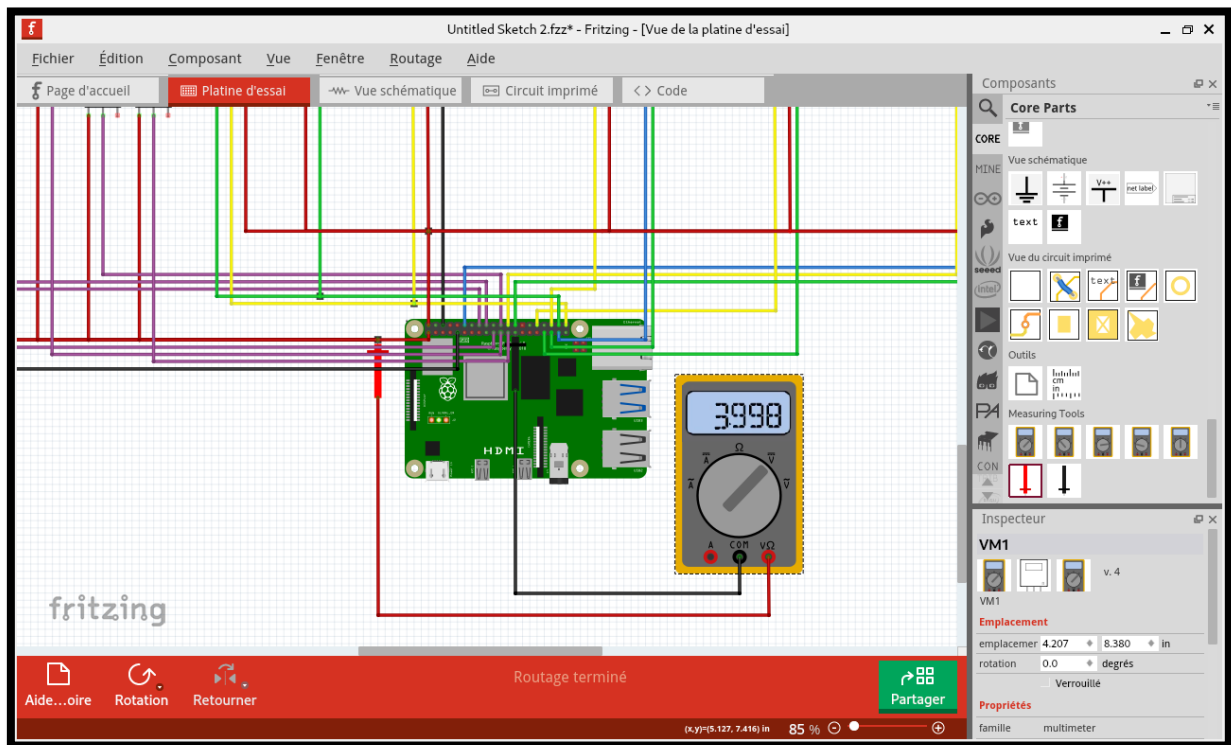


Figure 50: mesure avec multimètre

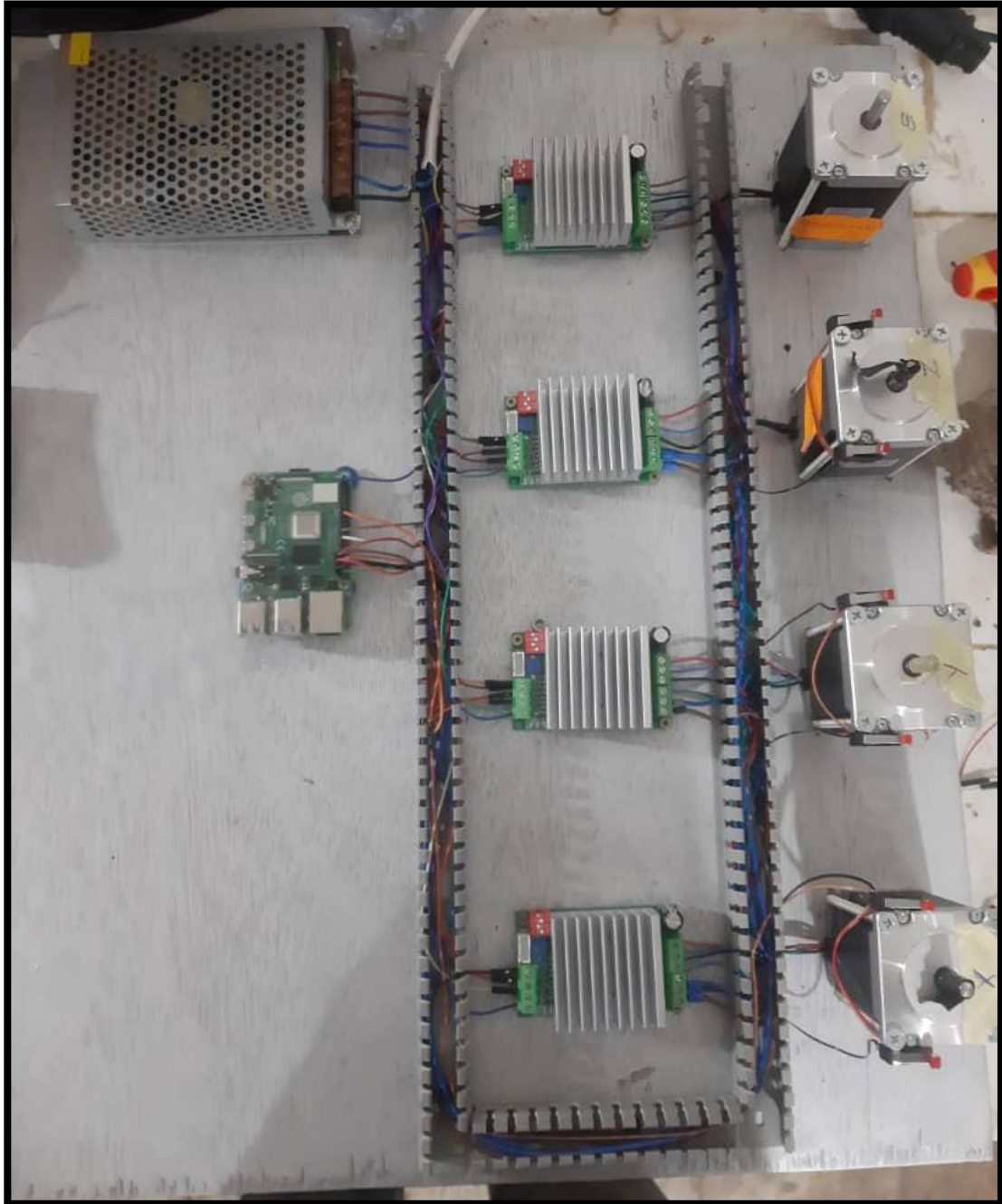
### ❖ Vérification des erreurs

Le simulateur vérifie que les appareils simulés sont conformes à leurs spécifications. Un symbole de fumée est ajouté au-dessus d'un appareil s'il fonctionne en dehors de ses spécifications.

## V.2.3 Réalisation du circuit

L'assemblage des composants électroniques consiste à souder minutieusement chaque élément en utilisant des outils tels qu'un fer à souder ou un pistolet à air chaud, selon les besoins. À chaque étape de l'assemblage, des tests intermédiaires sont réalisés, notamment des vérifications de la continuité des pistes et de l'intégrité des connexions, afin de s'assurer que le circuit fonctionne correctement.

Une fois l'assemblage terminé, une phase de tests et de validation est entamée. Cette étape inclut des mesures de tensions, des tests sous charge, et d'autres vérifications pour évaluer le bon fonctionnement du circuit par rapport aux spécifications initiales. En cas de divergence entre les résultats obtenus et les attentes, des ajustements ou des corrections sont effectués pour améliorer la performance globale du circuit et de ces composants.



*Figure 51: vue de dessus du câblage entre les composants électriques*



Figure 52 : vue de dessus du circuit électrique

## V.3 Partie mécanique

### V.3.1 Conception des pièces mécanique

#### V.3.1.1 Conception de la table

La structure de notre CNC a été réalisée par les éléments mécano-soudés qui sont des structures fabriquées par assemblage et soudage de profilés métalliques ou de tôles. Dans SolidWorks, la fonctionnalité "Structure Weldment" (éléments mécano-soudés) permet de

concevoir facilement ces structures en utilisant des profilés standard ou personnalisés. Nous avons utilisé les profilés standards comme éléments mécano-soudés dans SolidWorks :

- Profilés standards :

Il s'agit de barres ou tubes métalliques de différentes formes (carré, rectangulaire, circulaire, en L, en T, etc.) qui peuvent être utilisés pour créer des structures comme des châssis, des cadres ou des supports.

- Etape pour ajouter les éléments Mécano-souder :

Pour ajouter un élément mécano soudé il faut aller au Elément mécano-soudé (barre d'outils Constructions soudées) ou Insertion > Constructions soudées > Elément mécano-soudé. Ensuite, sélectionner des options dans le PropertyManager pour définir le profil de l'élément mécano-soudé, sélectionner des segments d'esquisse, dans la zone graphique, pour définir la trajectoire de l'élément mécano-soudé.

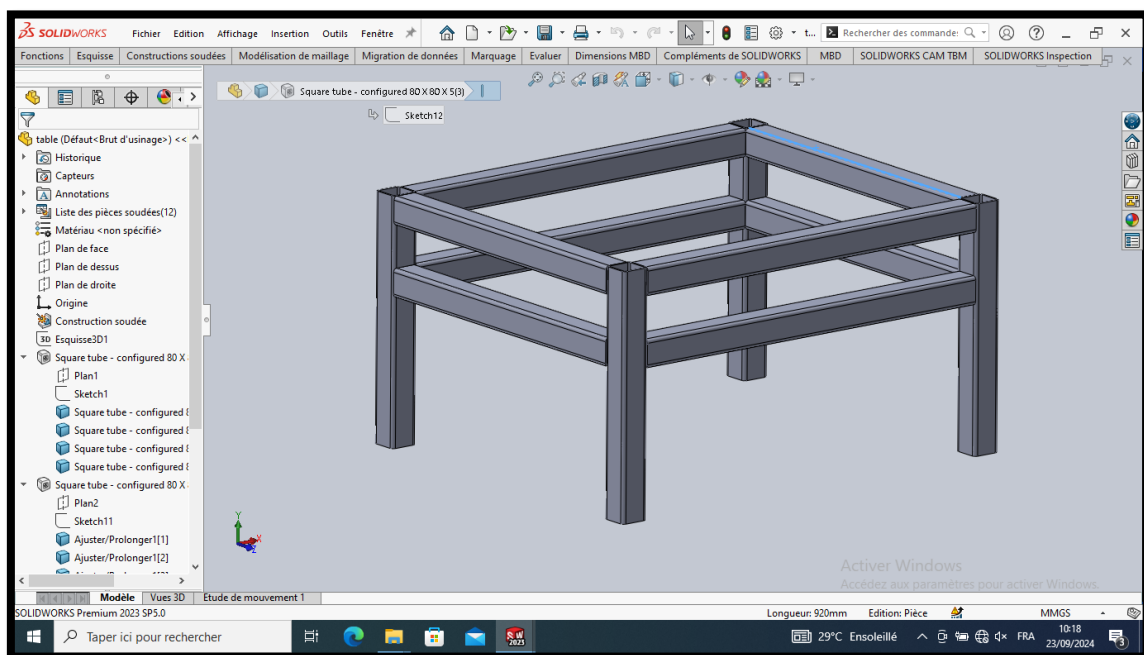


Figure 53: conception de la table avec élément mécano-soudé

### V.3.1.2 Conception du portique

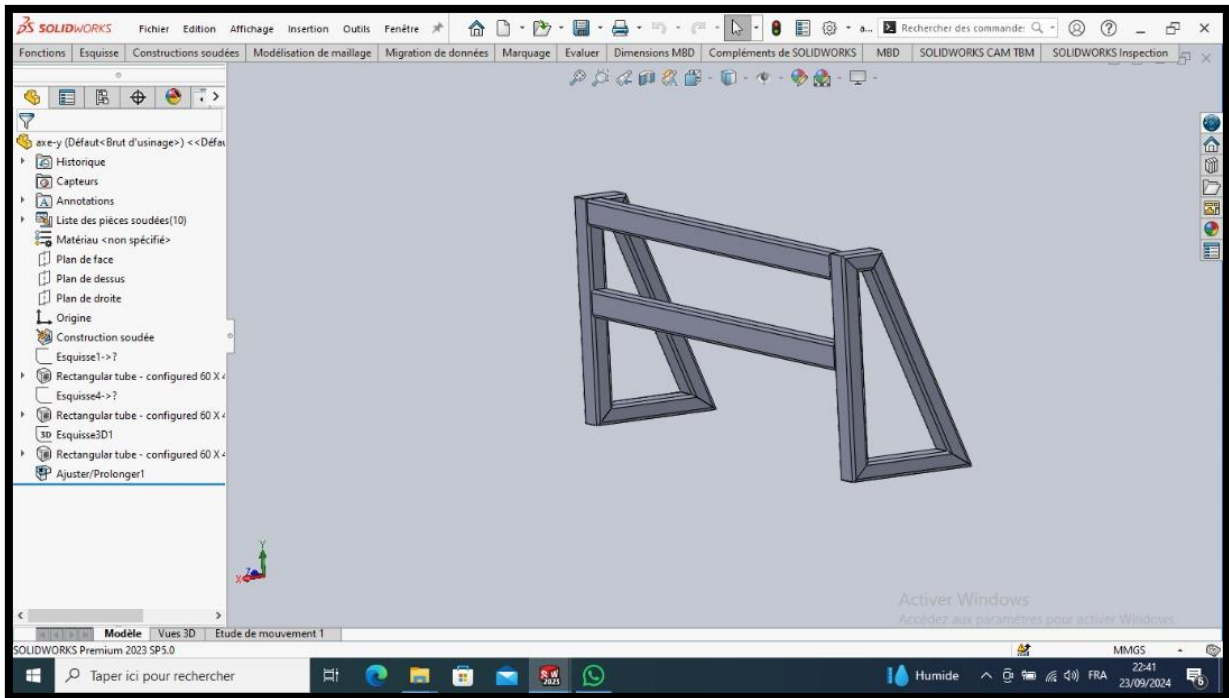
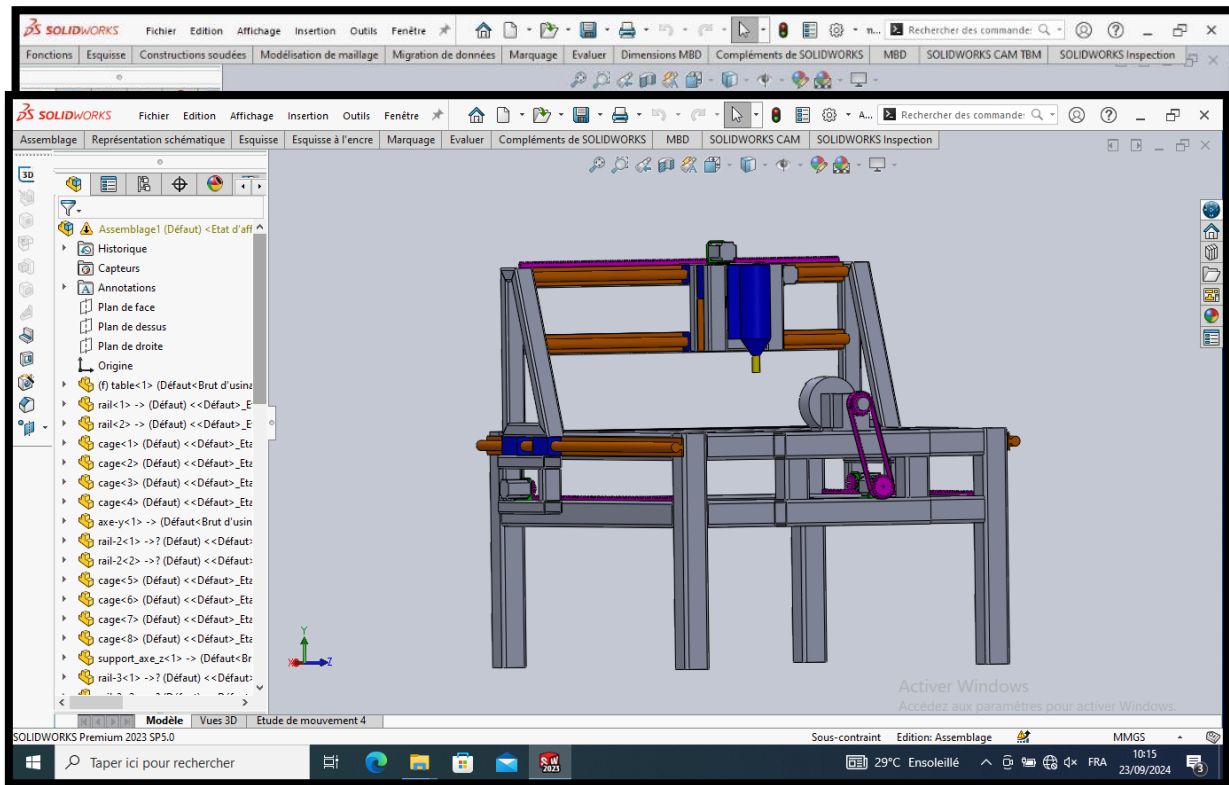


Figure 54 : conception du portique avec l'élément mécano-soudé

### V.3.1.3 Conception du mandrin

Figure 55 : conception du mandrin avec l'élément mécano-soudé



### V.3.1.4 Assemblage des pièces :

Figure 56: vue d'en face de la cnc 4 axes après assemblage de toutes les pièces

### V.3.2 Génération du code G

Pour créer un code G avec SolidWorks, il faut d'abord modéliser la pièce en 3D en s'assurant que toutes les dimensions et caractéristiques sont correctement définies. Ensuite, il est nécessaire d'ouvrir l'add-in CAMWorks et de sélectionner l'opération d'usinage souhaitée, telle que le fraisage ou le tournage. Les paramètres d'usinage, comme le choix des outils, les vitesses de coupe, les avances et les profondeurs, doivent être définis pour chaque opération. Une fois les paramètres définis, les trajectoires d'outils sont créées en choisissant une stratégie adaptée (contournage, poche, perçage, etc.).

Il est impératif de vérifier et simuler ces trajectoires pour éviter toute erreur ou collision. Après validation, on génère le code G en sélectionnant le post-processeur adapté et en spécifiant l'emplacement du fichier. Le code G est ensuite sauvegardé et prêt à être utilisé sur la machine CNC. Enfin, il est recommandé de réviser et optimiser le code G pour s'assurer qu'il correspond aux exigences d'usinage.

## V.4 Partie commande

### V.4.1 Installation d'un système d'exploitation sur le Raspberry Pi

Pour installer Raspberry Pi OS avec Raspberry Pi Imager, il s'agit d'une méthode simple et rapide pour préparer une carte micros avec Raspberry Pi OS ou d'autres systèmes d'exploitation. Il faut d'abord télécharger et installer Raspberry Pi Imager sur un ordinateur disposant d'un lecteur de carte SD. Ensuite, la carte SD à utiliser avec le Raspberry Pi est insérée dans le lecteur, et Raspberry Pi Imager est lancé.

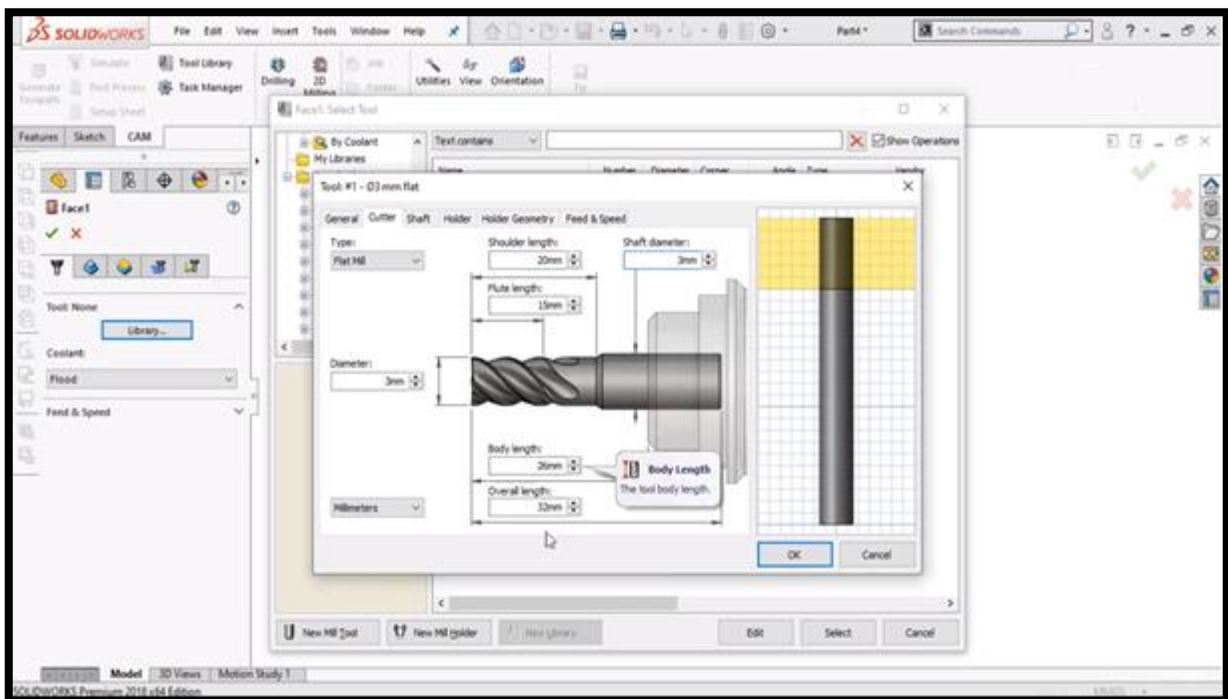


Figure 57 : méthode de génération du code G

Bien sûr il existe d'autres moyens pour installer un système d'exploitation sur une carte SD, et cela en utilisant d'autres logiciels que Raspberry Pi Imager sur tout si c'est un autre système que « Rasbian » qu'on voudrait installer.



Figure 59: Programme Raspberry Pi Imager

## V.4.2 Configuration du programme PyCNC

Voici les étapes de la modification et la configuration du programme Pycnc :

1 - le code original fonctionne sur Raspberry Pi 3, nous l'avons modifié et reconfigurer pour que la Raspberry Pi 4 l'interprète correctement.

```

1
2 import RPi.GPIO as GPIO
3 import time
4 from cnc.pulses import *
5 from cnc.config import *
6 from time import sleep
7
8 # Set up the GPIO pin
9 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
10
11 def init():
12     """ Initialize GPIO pins and machine itself.
13     """
14     GPIO.cleanup()
15
16     GPIO.setup(STEPPER_STEP_PIN_X, GPIO.OUT)
17     GPIO.setup(STEPPER_STEP_PIN_Y, GPIO.OUT)
18     GPIO.setup(STEPPER_STEP_PIN_Z, GPIO.OUT)
19     GPIO.setup(STEPPER_STEP_PIN_E, GPIO.OUT)
20     GPIO.setup(STEPPER_DIR_PIN_X, GPIO.OUT)
21     GPIO.setup(STEPPER_DIR_PIN_Y, GPIO.OUT)
22     GPIO.setup(STEPPER_DIR_PIN_Z, GPIO.OUT)
23     GPIO.setup(STEPPER_DIR_PIN_E, GPIO.OUT)
24     GPIO.setup(SPINDLE_PWM_PIN, GPIO.OUT)
25     GPIO.setup(FAN_PIN, GPIO.OUT)
26     GPIO.setup(BED_HEATER_PIN, GPIO.OUT)
27     GPIO.setup(STEPPERS_ENABLE_PIN, GPIO.OUT)
28     GPIO.setup(EXTRUDER_HEATER_PIN, GPIO.OUT)
29     GPIO.setup(ENDSTOP_PIN_X, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
30     GPIO.setup(ENDSTOP_PIN_Y, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
31     GPIO.setup(ENDSTOP_PIN_Z, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
32
33     GPIO.output(SPINDLE_PWM_PIN, GPIO.LOW)
34     GPIO.output(FAN_PIN, GPIO.LOW)
35     GPIO.output(EXTRUDER_HEATER_PIN, GPIO.LOW)
36     GPIO.output(BED_HEATER_PIN, GPIO.LOW)
37     GPIO.output(STEPPERS_ENABLE_PIN, GPIO.LOW)
38
39
40
41
42 def spindle_control(percent):
43     """ Spindle control implementation 0..100.
44     :param percent: Spindle speed in percent.
45     """
46     logging.info("spindle control: {}".format(percent))
47     print(f"spinning ... \t speed : {percent} %")
48     if percent == 0:
49         GPIO.output(SPINDLE_PWM_PIN, GPIO.LOW)
50     else:
51         GPIO.output(SPINDLE_PWM_PIN, GPIO.HIGH)
52
53
54 def fan_control(on_off):
55     """Cooling fan control.
56     :param on_off: boolean value if fan is enabled.
57     """
58     if on_off:
59         logging.info("Fan is on")
60     else:
61         logging.info("Fan is off")
62
63
64 # noinspection PyUnusedLocal
65 def extruder_heater_control(percent):
66     """ Extruder heater control.
67     :param percent: heater power in percent 0..100. 0 turns heater off.
68     """
69     pass
70
71
72 # noinspection PyUnusedLocal
73 def bed_heater_control(percent):
74     """ Hot bed heater control.
75     :param percent: heater power in percent 0..100. 0 turns heater off.
76     """
77     pass
78
79
80 def get_extruder_temperature():
81     """ Measure extruder temperature.

```

```

82     :return: temperature in Celsius.
83     """
84     return EXTRUDER_MAX_TEMPERATURE * 0.999
85
86
87     def get_bed_temperature():
88         """ Measure bed temperature.
89         :return: temperature in Celsius.
90         """
91         return BED_MAX_TEMPERATURE * 0.999
92
93
94     def disable_steppers():
95         """ Disable all steppers until any movement occurs.
96         """
97         logging.info("hal disable steppers")
98
99
100    def calibrate(x, y, z):
101        """ Move head to home position till end stop switch will be triggered.
102        Do not return till all procedures are completed.
103        :param x: boolean, True to calibrate X axis.
104        :param y: boolean, True to calibrate Y axis.
105        :param z: boolean, True to calibrate Z axis.
106        :return: boolean, True if all specified end stops were triggered.
107        """
108        logging.info("hal calibrate, x={}, y={}, z{}".format(x, y, z))
109        return True
110
111
112    # noinspection PyUnusedLocal
113    def move(generator):
114        """ Déplace la tête à la position spécifiée
115        :param generator: Objet PulseGenerator.
116        """
117        # Activer les steppers
118        GPIO.output(STEPPERS_ENABLE_PIN, GPIO.HIGH)
119
120        prev = 0
121        st = time.time()
122        k = 0
123        k0 = 0
124
125        US_IN_SECONDS = 1e-3
126
127        for direction, tx, ty, tz, te in generator:
128            if direction: # Configurer les directions
129                if tx is not None:
130                    GPIO.output(STEPDIR_PIN_X, GPIO.HIGH if tx > 0 else GPIO.LOW)
131                if ty is not None:
132                    GPIO.output(STEPDIR_PIN_Y, GPIO.HIGH if ty > 0 else GPIO.LOW)
133                if tz is not None:
134                    GPIO.output(STEPDIR_PIN_Z, GPIO.HIGH if tz > 0 else GPIO.LOW)
135                if te is not None:
136                    GPIO.output(STEPDIR_PIN_E, GPIO.HIGH if te > 0 else GPIO.LOW)
137                continue
138
139        pins = []
140        m = None
141        for i, pin in zip((tx, ty, tz, te), (STEPPER_STEP_PIN_X, STEPPER_STEP_PIN_Y, STEPPER_STEP_PIN_Z, STEPPER_STEP_PIN_E)):
142            if i is not None:
143                pins.append(pin)
144                if m is None or i < m:
145                    m = i
146
147        k = int(round(m * US_IN_SECONDS))
148        if k - prev > 0:
149            pass
150            #time.sleep((k - prev) * US_IN_SECONDS)
151
152        for pin in pins:
153            GPIO.output(pin, GPIO.HIGH)
154
155        time.sleep(STEPPER_PULSE_LENGTH_US * US_IN_SECONDS / len(pins))
156
157        for pin in pins:
158            GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
159
160        prev = k + STEPPER_PULSE_LENGTH_US
161
162        pt = time.time()
163        logging.info("préparé en " + str(round(pt - st, 2)) + "s, estimé en "
```

```

163     logging.info("préparé en " + str(round(pt - st, 2)) + "s, estimé en "
164                 + str(round(generator.total_time_s(), 2)) + "s")
165
166     # Désactiver les steppers
167     GPIO.output(STEPPERS_ENABLE_PIN, GPIO.LOW)
168
169
170     def join():
171         """ Wait till motors work.
172         """
173         logging.info("hal join()")
174
175
176     def deinit():
177         """ De-initialise.
178         """
179         logging.info("hal deinit()")
180
181
182     def watchdog_feed():
183         """ Feed hardware watchdog.
184         """
185         pass

```

*Figure 60 : Un des codes de base modifié fonctionnant sur Raspberry Pi 4*

2 - on a configuré le fichier config.py pour qu'il s'adapte aux caractéristiques de notre machine CNC (dimensions, sens de rotation, vitesse de déplacement ...)

```

1  # -----
2  # Hardware config.
3
4  # Maximum velocity for each axis in millimeter per minute.
5  MAX_VELOCITY_MM_PER_MIN_X = 2500
6  MAX_VELOCITY_MM_PER_MIN_Y = 12000
7  MAX_VELOCITY_MM_PER_MIN_Z = 600
8  MAX_VELOCITY_MM_PER_MIN_E = 1500
9  MIN_VELOCITY_MM_PER_MIN = 1
10 # Average velocity for endstop calibration procedure
11 CALIBRATION_VELOCITY_MM_PER_MIN = 300
12
13 # Stepper motors steps per millimeter for each axis.
14 STEPPER_PULSES_PER_MM_X = 50
15 STEPPER_PULSES_PER_MM_Y = 100
16 STEPPER_PULSES_PER_MM_Z = 400
17 STEPPER_PULSES_PER_MM_E = 150
18
19 # Invert axes direction, by default(False) high level means increase of
20 # position. For inverted(True) axis, high level means decrease of position.
21 STEPPER_INVERTED_X = True
22 STEPPER_INVERTED_Y = False
23 STEPPER_INVERTED_Z = False
24 STEPPER_INVERTED_E = True
25
26 # Invert zero end stops switches. By default(False) low level on input pin
27 # means that axis in zero position. For inverted(True) end stops, high level
28 # means zero position.
29 ENDSTOP_INVERTED_X = True
30 ENDSTOP_INVERTED_Y = True
31 ENDSTOP_INVERTED_Z = False # Auto leveler
32
33 # Workplace physical size.
34 TABLE_SIZE_X_MM = 1000
35 TABLE_SIZE_Y_MM = 200
36 TABLE_SIZE_Z_MM = 220
37
38 # Mixed settings.
39 STEPPER_PULSE_LENGTH_US = 2
40 STEPPER_MAX_ACCELERATION_MM_PER_S2 = 3000 # for all axis, mm per sec^2
41 SPINDLE_MAX_RPM = 10000
42 EXTRUDER_MAX_TEMPERATURE = 250
43 BED_MAX_TEMPERATURE = 100
44 MIN_TEMPERATURE = 40
45 EXTRUDER_PID = {"P": 0.059161177519,
46                "I": 0.00206217171374,
47                "D": 0.206217171374}
48 BED_PID = {"P": 0.226740848076,
49            "I": 0.00323956215053,
50            "D": 0.323956215053}
51

```

Figure 61 : le fichier config.py des caractéristiques machine modifiée selon notre CNC

3 - Nous avons créé une interface graphique (.ui) pour faciliter l'interaction avec le programme (machine), on a utilisé une bibliothèque graphique appelée « PyQt6 »

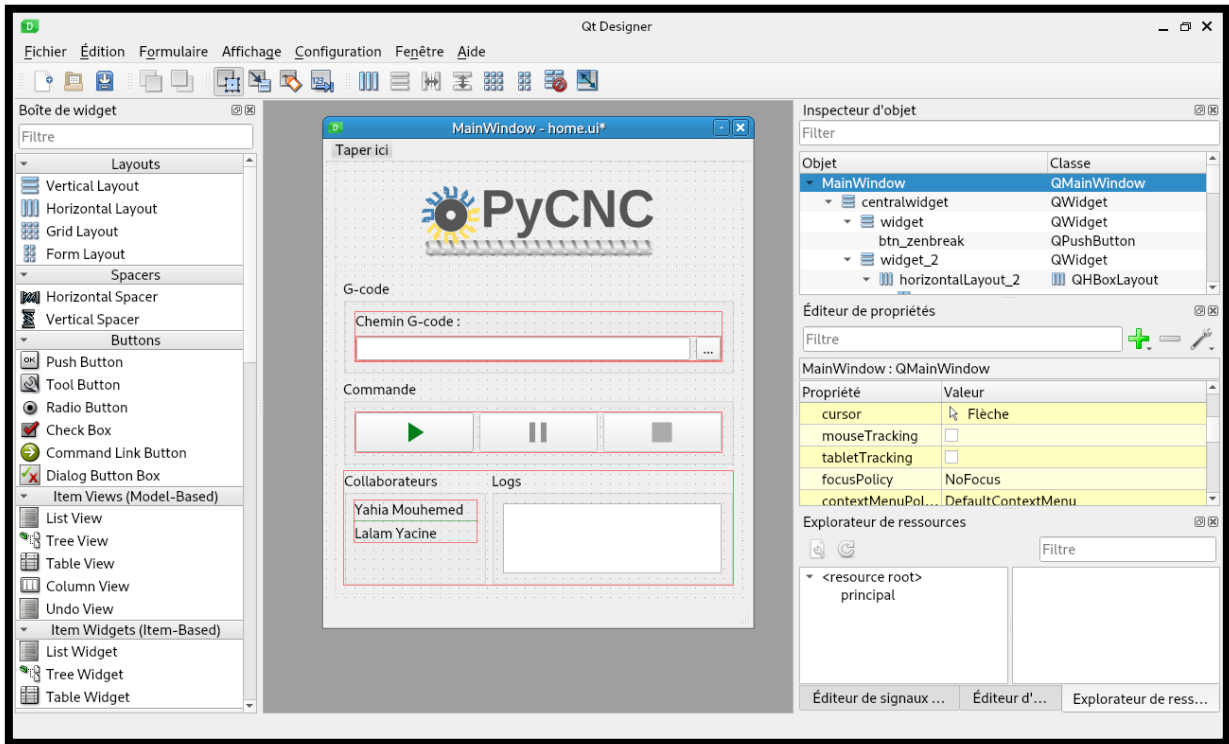


Figure 62 : création del'interface graphique de la bibliothèque graphique PyQt6

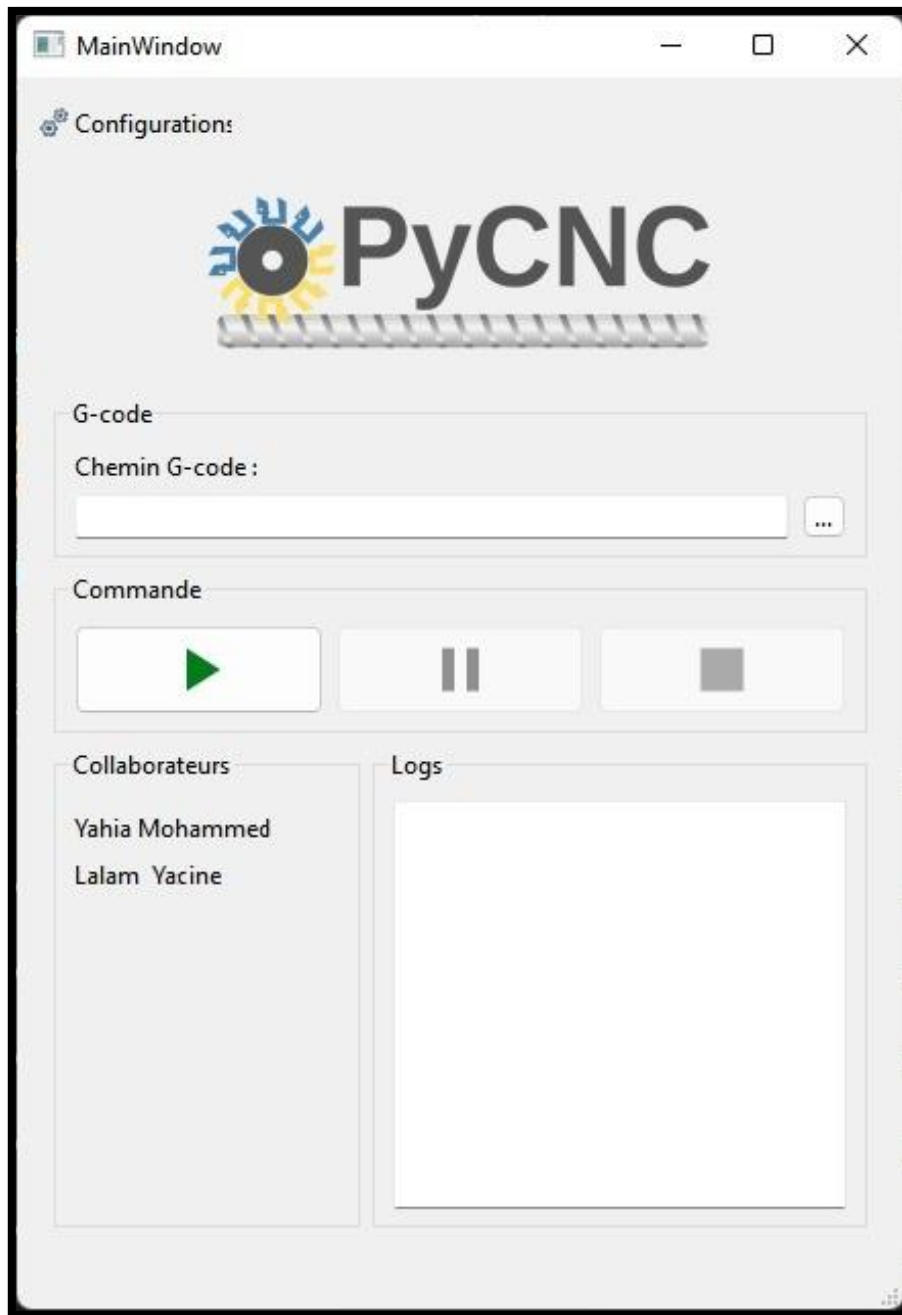


Figure 63: interface graphique, Accueil

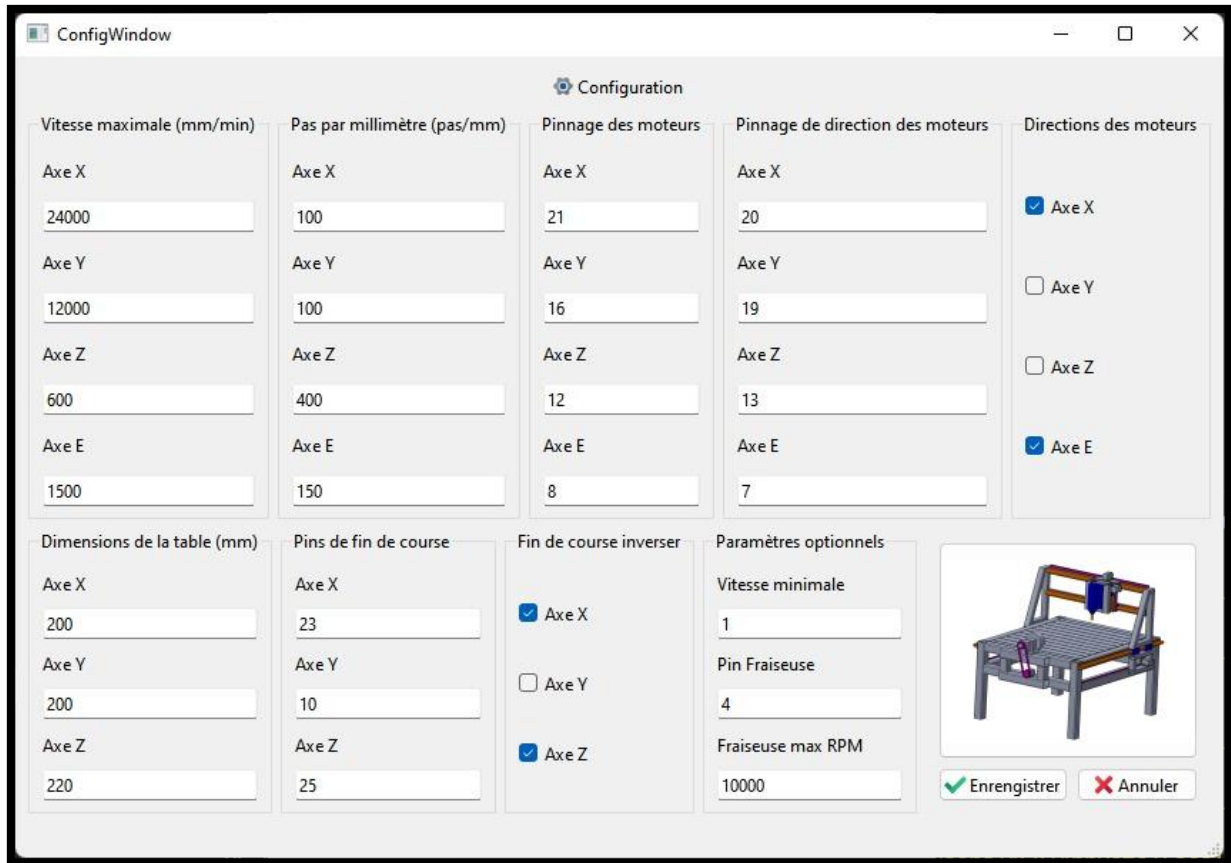


Figure 64: interface graphique, fenêtre de configuration paramètre machine

## V.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a détaillé l'ensemble des étapes menant à la réalisation de notre CNC 4 axes. La conception du circuit électrique et sa simulation ont permis de s'assurer que tous les composants fonctionnent correctement avant la mise en œuvre physique. La conception soignée des pièces mécanique a été essentielle pour garantir la stabilité et la précision de la machine lors des opérations d'usinage. De plus, l'installation et la configuration du système de commande via Raspberry Pi et PyCNC ont finalisé l'intégration des différentes parties du projet. Grâce à ces étapes rigoureuses, nous avons pu concrétiser les objectifs initiaux, transformant la théorie en une machine fonctionnelle, prête à être utilisée dans divers contextes d'usage. Ces réalisations témoignent du succès de l'approche méthodologique adoptée tout au long du projet.

# Conclusion Générale

La réalisation de ce projet de CNC 4 axes a constitué un véritable défi technique qui a permis d'explorer divers aspects de la conception et de l'assemblage d'une machine-outil à commande numérique. Notre travail s'est articulé autour de deux axes principaux : la **conception et la réalisation de la partie électrique**, et la **conception exclusive de la partie mécanique**.

Nous avons pu aboutir à des résultats concrets sur la partie électrique, incluant la conception et la mise en place d'un circuit complet de commande basé sur un Raspberry Pi 4, des moteurs pas à pas avec leurs contrôleurs, ainsi qu'un système d'affichage. La configuration logicielle, notamment l'installation et la configuration de PyCNC et la génération du G-code, a permis de valider le fonctionnement global du système, assurant une gestion précise des déplacements sur les quatre axes. PyCNC étant un programme d'interprétation d'exécution de G-code sans interface graphique, nous avons pu en créer une tactile qui a permis une interaction intuitive et plus rapide avec la machine. Ces résultats démontrent la capacité de la machine à exécuter des opérations de base avec un bon contrôle des mouvements.

En revanche, la partie mécanique a été **conçue mais non réalisée**, ce qui a limité nos tests pratiques sur les composants mécaniques. Toutefois, grâce à la modélisation 3D sur SOLIDWORKS et la simulation des pièces, nous avons pu valider la faisabilité de la conception et estimer les performances attendues en termes de précision et de rigidité.

Ce projet nous a permis de développer des compétences variées dans les domaines de la conception assistée par ordinateur, de l'électronique, de la programmation et de l'automatisation. Nous avons appris à gérer des systèmes complexes combinant des composants matériels et logiciels, ainsi qu'à résoudre des problèmes techniques imprévus lors de la mise en œuvre de la partie électrique. La maîtrise des logiciels de simulation et de conception a été un atout majeur pour garantir la cohérence et la viabilité du projet dans sa globalité. Nous avons acquis un savoir considérable concernant la réalisation complète d'une machine à commande numérique fonctionnant avec un quatrième axe de plus.

Pour l'avenir, plusieurs axes d'amélioration sont envisageables pour augmenter les performances et la polyvalence de la machine :

1. Réalisation de la partie mécanique : Le passage à la fabrication réelle de la structure mécanique permettra de valider pleinement les choix de conception et d'améliorer la précision des usinages.
2. Amélioration du contrôle en boucle fermée : Intégrer des capteurs plus précis et un retour d'information en temps réel permettrait de mieux contrôler les écarts et d'ajuster les mouvements de manière plus fine.
3. Renforcement de la sécurité : L'ajout d'une armoire électrique protégerait les composants sensibles et renforcerait la sécurité avec des disjoncteurs et un bouton d'arrêt d'urgence. Ce dispositif éviterait les risques électriques et améliorerait la protection de la machine.

En conclusion, ce projet a posé les bases d'une CNC 4 axes prometteuse, qui reste encore à optimiser et à finaliser. Les résultats obtenus sur la partie électrique sont encourageants et

ouvrent la voie à des développements futurs, tant sur le plan mécanique que logiciel, pour aboutir à une machine plus performante et polyvalente.

---

# *Bibliographie*

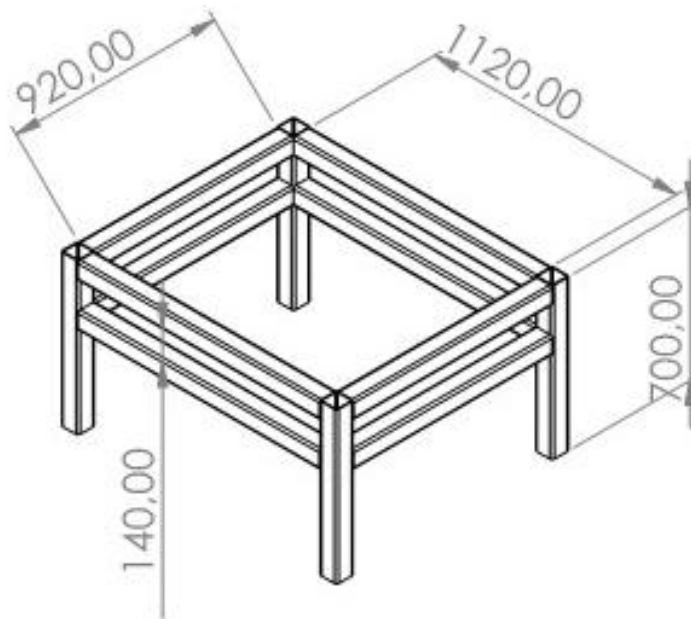
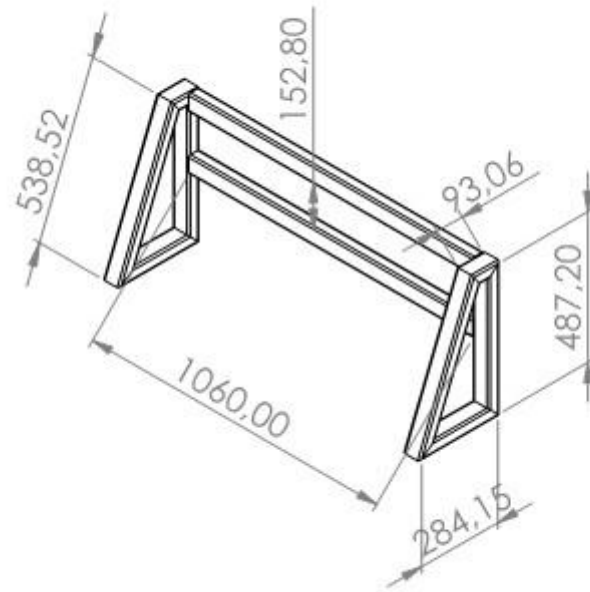
---

## Bibliographie:

- [2] Morched Dallali "Concept of CNC Machine" , Bachelor thesis, Centers Slovak University of Technology in Bratislava Faculty of Mechanical Engineering May 2010.
- [3] Mohammad Louie Oyoum "Computer Numerical Control (CNC)", cours ,Istanbul Aydin University October 2020.
- [4] Prof. Olivier de Weck, "Engineering Design and Rapid Prototyping", Department of Aeronautics and Astronautics and Engineering Systems Division Massachusetts Institute of Technology Cambridge , Lecture 4. 6 January 2005.
- [5] Staroveški, T., et al. Implementation of a Linux-based CNC open control system. in 12th International Scientific Conference on Production Engineering–CIM. 2009.
- [6] Chanez Guerrouabi, Roza Ait Rahmane. Etude et conception d'une machine CNC (Découpeuse laser). Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [7] Djamel SMAINI, Rafik BEN KADI.«Conception et réalisation d'une machine CNC».UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Algérie, 2015.
- [8] Claude Barlier, Lionel Girardin. «Mémotech productique : matériaux et usinage». Ed. Casteilla, pp 406,1992.
- [13] Hans B. Kief and Helmut A. Roschiwal. CNC Handbook. McGraw-Hill Education, 2012.
- [14] Alan Overby, CNC Machining Handbook Building, Programming, and Implementation, 6 octobre 2010
- [15] Aid Mohamed Amine, conception et réalisation d'une machine-outil à commande numérique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2017/2018
- [16] Zammouchi et Bougaila,Conception et réalisation d'une machine CNC à 3 axes,université de blida2, 2021
- [17] Zirar Bilal, Houti Ibrahim, Machine CNC à 4 Axes: conception et simulation,UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA,2020
- [24] AKLI Mahdi, GRIM Fayçal, CHIKHI Ameziane,Conception et réalisation d'une fraiseuse à commande numérique (CNC),Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2011
- [1] <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d>
- [9] <https://prototool.com/fr/4-axis-cnc/>
- [10] <https://capablemachining.com/fr/Articles/qu%27est-ce-qu%27un-usinage-CNC-4-axes-et-comment-%C3%A7a-marche/#h-how-4-axis-cnc-machining-works>
- [11] <https://www.runsom.com/fr/technology/guide-to-4-axis-cnc-machining/#applications-of-4axis-cnc-machines>
- [12] <https://at-machining.com/fr/4-axis-cnc-machining/>

- [18] <https://www.amazon.com/S-120-12-12VDC-Single-Switching-Supply/dp/B07Y7KHTLH>
- [19] <https://www.raspberrypi.com/about/>
- [20] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)
- [21] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/?resellerType=education>
- [22] [https://www.studiopieters.nl/raspberry-pi-4-model-b-pinout/#google\\_vignette](https://www.studiopieters.nl/raspberry-pi-4-model-b-pinout/#google_vignette)
- [23] <https://www.omc-stepperonline.com/fr/support/qu-est-ce-qu-un-moteur-pas-a-pas>
- [25] [https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/guettafi\\_amor/files/5-moteurs\\_pas\\_a\\_pas.pdf](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/guettafi_amor/files/5-moteurs_pas_a_pas.pdf).
- [26] <https://botland.store/stepper-motors/14553-stepper-motor-jk57hs76-2804-200-stepsrot-3v-28a-189nm-5904422342524.html>
- [27] <https://makerhardware.net/knowledge-base/electronics/tb6600-stepper-motor-driver/>
- [28] <https://www.runsom.com/fr/design-tips/cnc-spindle/>
- [29] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-touch-display/>
- [30] <https://www.nouvelleecole.fr/blog/solidworks-guide-complet-pour-dbutants>
- [31] <https://pypi.org/project/pycnc>
- [32] [https://www.mekanika.io/fr\\_BE/blog/apprentissage-1/notre-guide-pour-tout-savoir-sur-le-g-code-et-les-post-processeurs-cnc-16](https://www.mekanika.io/fr_BE/blog/apprentissage-1/notre-guide-pour-tout-savoir-sur-le-g-code-et-les-post-processeurs-cnc-16)
- [33] <https://fritzing.org/about/context>
- [34] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi\\_OS#cite\\_note-3](https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi_OS#cite_note-3)

# Anex



**Echelle 1:100**

**Nom des pièces :**

Table ; portique

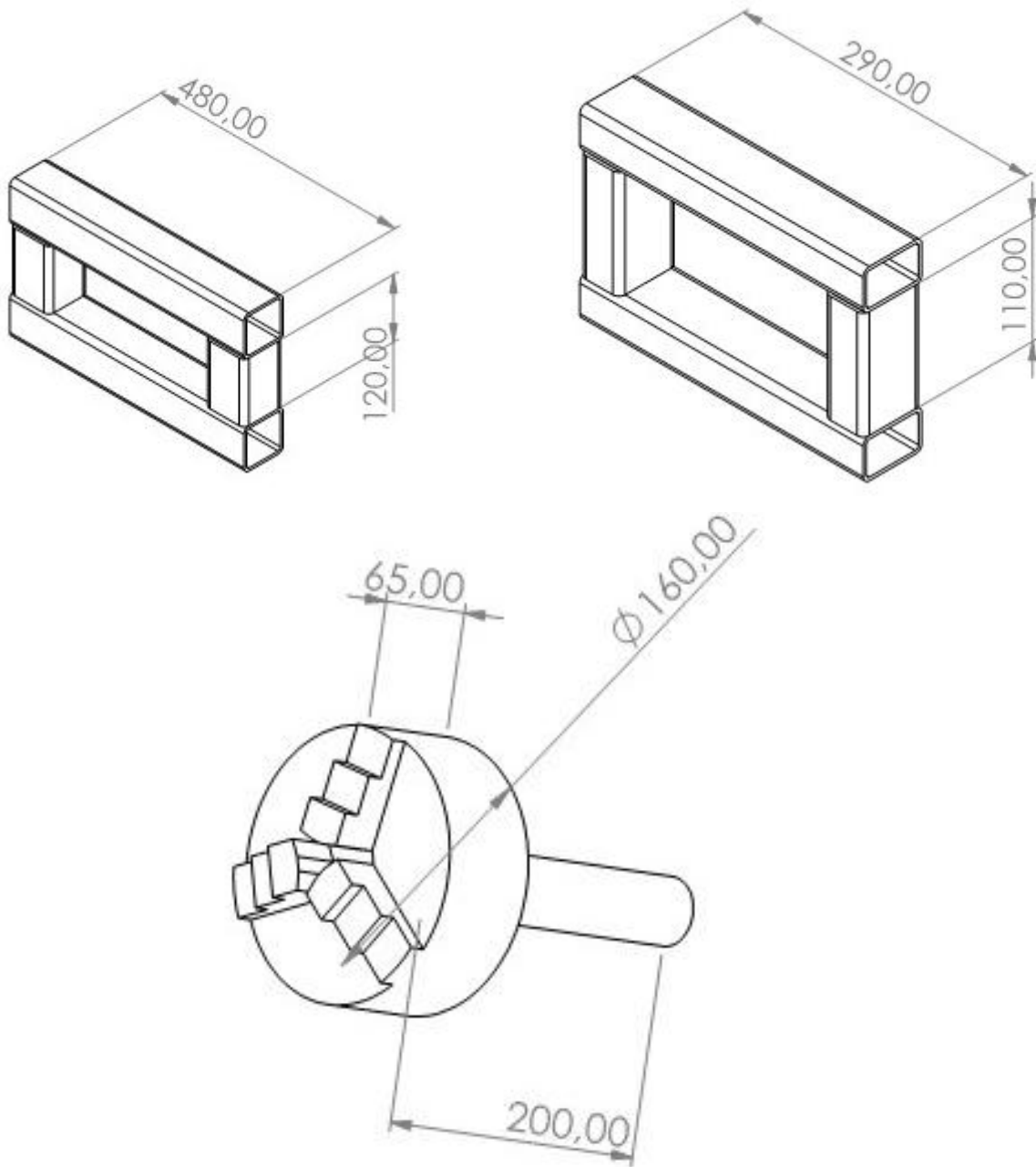
conception et à la réalisation d'une machine à commande  
numérique à 4 axes

Mise à jour  
**21/09/2024**

Dessiné par : Yahia Mohamed  
Lalam Yacine

Fichiers:  
**portique.slddrw ; table.slddrw**

# Anex



|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Echelle 1:100</b>   | <b>Nom des pièces :</b><br>Mandrin ; supports |   |
| conception et à la réalisation d'une machine à commande numérique à 4 axes |   |   |
| Mise à jour<br><b>21/09/2024</b>   | Dessiné par : Yahia Mohamed<br>Lalam Yacine   | Fichiers: <b>Mandrin.slddrw ;</b><br><b>support1.slddrw ;</b><br><b>support2.slddrw</b> |