REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté *des Sciences et de la technologie*

Département Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Électrotechnique

Spécialité : commande électrique

Par

➢ **TALEB AYMEN**

Intitulé

Étude, conception, réalisation et simulation d'un prototype de machine CNC (Computer Numerical Control).

Soutenu le : 21/06/2026

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	*Grade*	*Qualité*	*Etablissement*
Mr E. MERABET	***Pr***	***Président***	***Univ-BBA***
Mr. F. ZEBIRI	***MCA***	***Encadreur***	***Univ-BBA***
Mr. T.BEN SIDHOUM	***MCA***	***Encadreur***	***Univ-BBA***
Mr. FALEH ABDALLAH	***MCB***	***Examinateur***	***Univ-BBA***

Année Universitaire 2025/2026

Résumé :

الملخص:

يتمثل هذا المشروع في دراسة وتصميم وإنجاز آلة تحكم رقمي بالحاسوب (CNC) مصغرة، ويهدف إلى تعميق المعارف في مجال التصنيع الرقمي، في ضوء أحدث التطورات التي شهدتها تقنيات وآلات .CNC كما يهدف إلى تقليل تكلفة إنجاز آلة CNC مقارنةً باقتناء آلة جاهزة متوفرة في السوق.وقد قُسِّم هذا العمل إلى ثلاثة أجزاء رئيسية؛ يتناول الجزء الأول دراسة عامة حول آلةCNC ، بينما يخصص الجزء الثاني لتصميم الآلة ومختلف مكوناتها، أما الجزء الثالث فيعرض مراحل الإنجاز والبرمجة والتشغيل، مع تقييم أداء النموذج المنجز.

Résumé :

Ce projet consiste en l'étude, la conception et la construction d'une mini-machine CNC, dans le but d'approfondir les connaissances dans le domaine de la fabrication numérique. À la lumière des dernières avancées en matière de machines CNC, Il a également pour objectif de réduire les coûts par rapport à l'achat d'une machine prête à l'emploi disponible sur le marché. Ce mémoire est structuré en trois parties principales : la première présente une étude générale sur la machine CNC, la deuxième est consacrée à la conception de la machine, tandis que la troisième traite de sa réalisation, de sa programmation et de sa mise en fonctionnement.

Abstract :

This project involves the study, design, and construction of a mini CNC machine. The aim of this work is to deepen knowledge in the field of digital manufacturing. Given the latest advancements in CNC machines, It also aims to reduce costs compared to purchasing a ready-made machine available on the market. This dissertation is divided into three main parts: the first presents a general study of the CNC machine, the second deals with the machine design, and the third covers its construction, programming, and operation.

Remerciements

Tout d’abord, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m’a accordé la santé, la volonté et la persévérance nécessaires pour entreprendre et mener à bien ce modeste travail.

J’adresse ensuite mes plus sincères remerciements à mes encadreurs, Monsieur Zebiri Fouad et Monsieur Ben Sidahmed Tarek, pour leur accompagnement précieux. Sans leurs efforts, leurs conseils avisés et leurs orientations, ce travail n’aurait pas atteint ce niveau de qualité. Je leur suis profondément reconnaissant pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement, leur patience, leur rigueur et leur disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d’évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et leurs critiques constructives qui contribueront à son amélioration.

Enfin, j’exprime ma gratitude à l’ensemble des enseignants du département de Contrôle Électrique pour leur soutien, leurs enseignements et leur présence tout au long de mon parcours universitaire.

الشكر والتقدير

الحمد لله سبحانه وتعالى الذي وفقني وأعانني، ومنحني الصحة والعزيمة لإتمام هذا العمل، فله الحمد والشكر على نعمه التي لا تُحصى.

أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى المشرفين الكريمين الأستاذ زبيري فؤاد والأستاذ بن سيدهم طارق، على حسن إشرافهما وتوجيهاتهما القيّمة، وعلى ما قدماه من نصائح علمية ومتابعة مستمرة، وصبر وتفانٍ طوال مراحل إنجاز هذه المذكرة. فبفضل دعمهما وإرشاداتهما كان لهذا العمل أن يخرج بهذه الصورة، فلهما مني أسمى عبارات الشكر والتقدير.

كما أتوجه بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الكرام على تفضلهم بقبول مناقشة هذا العمل وتقييمه، وعلى ملاحظاتهم القيّمة واقتراحاتهم البنّاءة التي من شأنها أن تثري هذا البحث.

ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر إلى جميع أساتذة قسم التحكم الكهربائي، لما قدموه لنا من علم ومعرفة طوال سنوات الدراسة، وإلى كل من ساهم، من قريب أو بعيد، في إنجاز هذا العمل.

وفي الختام، أسأل الله تعالى أن يجزي كل من ساعدني خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل نافعًا ومفيدًا.

Dédicaces

Dédicaces:

Louange à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je dédie le fruit de mes efforts à mes très chers parents, qui ont toujours été mon soutien et ma source de motivation tout au long de mon parcours académique. Leur amour, leurs encouragements et leurs prières ont été essentiels à ma réussite.

À mes frères, mes sœurs et à toute ma famille, pour leur soutien moral et leur présence constante.

À mes enseignants, qui m'ont transmis le savoir et guidé sur le chemin de la connaissance.

À mes amis et collègues, avec qui j'ai partagé les moments d'étude et de travail, et qui m'ont apporté aide et encouragements.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je dédie ce travail à tous les étudiants qui poursuivent leurs rêves avec détermination et ambition.

الإهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل.

أهدي ثمرة جهدي هذه إلى أغلى الناس في حياتي، إلى والديّ العزيزين، اللذين كانا خير سند وعون لي طوال مسيرتي الدراسية، وأحاطاني بحبهما ورعايتهما، ولم يبخلا عليّ بدعمهما وتشجيعهما ودعواتهما الصادقة، فلهما مني كل التقدير والعرفان.

وإلى إخوتي وأفراد عائلتي الكريمة، الذين كانوا دائمًا إلى جانبي، يساندونني ويشجعونني في مختلف مراحل حياتي.

وإلى أساتذتي الأفاضل، الذين أناروا لي طريق العلم والمعرفة، وأسهموا بتوجيهاتهم ونصائحهم في تكوين مسيرتي العلمية.

وإلى أصدقائي وزملائي، الذين شاركوني مشوار الدراسة، وقدموا لي الدعم والمساندة، وكانوا خير رفقة طوال هذه الرحلة.

Sommaire

Introduction générale 1

I. Généralités sur les machines CNC……...4

I.1 Introduction 4

I.2 Aperçu historique de la CNC 4

I.3 Définition de la commande numérique 5

I.4 Définition d'une machine CNC 5

I.5 Composants d'une machine CNC 5

I.5.1 La partie opérative 6

I.5.2 La partie commande 6

I.6 Domaine d'utilisation 7

I.6.1 Industrie manufacturière 7

I.6.2 Menuiserie et travail du bois 7

I.6.3 Industries métallurgiques 7

I.6.4 Fabrication additive (impression 3D) 7

I.6.5 Industrie plastique 7

I.6.6 Industrie du verre 7

I.6.7 Domaines artistiques 7

I.7 Types de machines CNC 8

I.7.1 Machines d'enlèvement de matière (usinage par copeaux) 9

I.7.2 Machines d'électroérosion 9

I.7.3 Machines de découpe 9

I.8 Classification des machines CNC 9

I.8.1 Classification des systèmes CNC selon le mode de fonctionnement 9

I.8.2 Classification des machines CNC selon le mode de fabrication 10

I.9 Systèmes d'une machine CNC 12

I.9.1 Le système électronique 12

I.9.2 Le système mécanique 12

I.9.3 Système de programmation 13

I.10 Conclusion 13

II. Conception d'une machine CNC 15
II.1 Introduction 15
II.2 Cahier des charges 15
II.2.1 Fonction principale 15
II.2.2 Fonctions secondaires 16
II.3 Fonctions proposées variables 16
II.4 Structure générale d'une machine CNC à trois axes. 17
II.4.1 La partie mécanique 17
II.4.2 Système de guidage 17
II.4.3 Rail de guidage 18
II.5 Système de transformation du mouvement 18
II.5.1 Système vis–écrou 18
II.5.2 Accouplement 19
II.6 Conception et dimensionnement 19
II.6.1 Détermination des masses 19
II.6.2 Conception des vis hélicoïdales 21
A. Rendement du système vis–écrou 21
II.6.3 Charge appliquée sur la vis de l'axe Z 21
II.6.4 Conception de la vis trapézoïdale selon l'axe Y 23
II.6.5 Conception de la vis trapézoïdale de l'axe X 23
II.7 Moteur et partie électronique 23
II.7.1 Les moteurs pas à pas 24
A. Les différents types de moteurs pas à pas 26
B. Comparaison des 3 types de moteurs 26
C. Étude des moteurs pas à pas hybrides 27
II.7.2 Commande des moteurs pas à pas 27
a. Commande des moteurs pas à pas à l'aide du A4988 28
b. Connexions électriques 28
c. Signaux de commande 29
II.8 Carte Arduino UNO 29
II.8.1 Raisons du choix de la carte Arduino 30

II.9 Carte CNC Shield 31
II.10 Interrupteur de fin de course 32
II.11 Alimentation 32
II.12 Conclusion 33

III. Conception d'une machine CNC 35
III.1 Introduction 35
III.2 Structure mécanique 35
III.2.1 Axe y 36
III.2.2 Axe x 37
III.2.3 Axe z 37
III.3 Assemblage complet de la machine CNC 38
III.4 Câblage électrique 38
III.4.1 Assemblage de l'Arduino et du CNC Shield 39
III.4.2 Câblage électrique global 39
III.5 Chaîne de programmation 40
III.6 Description des logiciels utilisés 41
III.6.1 G-Code 41
III.6.2 Logiciel Arduino IDE 42
III.6.3 GRBL 43
III.6.4 Installation de GRBL sur la carte Arduino 43
III.6.5 Universal G-Code Sende 43
III.6.6 Inkscape 44
III.7 Fonctionnement et application 45
III.7.1 Création du texte dans Inkscape 45
III.7.2 Conversion du texte en tracé 46
III.7.3 Enregistrement du fichier 47
III.7.4 Importation dans JSCut 48
III.7.5 Réglage des paramètres d'usinage 48
III.7.6 Choix du type d'opération (Operation) 49
III.7.7 Génération du G-code 49
III.7.8 Enregistrement du fichier G-code 49
III.7.9 Exécution sur la machine CNC 50

III.8 Tableau des coûts du projet 51
III.9 Conclusion 52

Figure

Figure 1 Commande numérique par contournage. 7
Figure 2 Domaine d'utilisation des M.O.C.N. [2] 8
Figure 3 Fonctionnement en boucle ouvert. [1] 9
Figure 4 Commande en boucle fermée. 10
Figure 5 Commande numérique point à point. 11
Figure 6 Commande numérique par axe. 11
Figure 7 Commande numérique par contournage. 12
Figure 8 Structure mécanique d'une machine CNC. [2] 13
Figure 9 Spécifications de la machine. 15
Figure 10 Variables de la machine. [1] 16
Figure 11 Schéma théorique d'une CNC 3 axes. [1] 17
Figure 12 Douilles à billes. 18
Figure 13 Douilles à billes. 18
Figure 14 Système vis–écrou. 19
Figure 15 Accouplement semi-flexible. [3] 19
Figure 16 Modèle tridimensionnel de la machine. 20
Figure 17 Système de déplacement selon l'axe Z. 21
Figure 18 Système de déplacement selon l'axe Z. 23
Figure 19 Système de déplacement selon l'axe Y. 23
Figure 20 Partie électronique. 24
Figure 21 Différents types de moteurs pas à pas. 26
Figure 22 Avantage de la présence d'un rotor aimanté. [3] 27
Figure 23 Drivers de moteurs pas à pas. 28
Figure 24 Schéma de câblage du driver du moteur pas à pas. [1] 29
Figure 25 Carte Arduino UNO. 30
Figure 26 Brochage du ATmega328. 30
Figure 27 Carte CNC Shield V3. [6] 31
Figure 28 Assemblage du driver A4988 et de la carte CNC Shield avec la carte Arduino. 32
Figure 29 Interrupteur de fin de course. 32
Figure 30 Boîtier d'alimentation. [6] 33
Figure 31 Représentation des composants utilisés dans la machine CNC. 35
Figure 32 Structure mécanique de la machine 36
Figure 33 Structure mécanique de la machine 36
Figure 34 Axe X de la machine 37
Figure 35 Axe Z de la machine. 38
Figure 36 Figure finale de la machine 38
Figure 37 Le schéma électrique global illustre l'ensemble du câblage du système. 40
Figure 38 Chaîne de programmation 40
Figure 39 Il représente la fenêtre principale du logiciel ' Arduino IDE' 42
Figure 40 Présentation des boutons. 42
Figure 41 Présentation des boutons. 44
Figure 42 Interface du logiciel Inkscape 45
Figure 43 Interface du logiciel JSCut 46
Figure 44 Écriture du mot «طالب ايمن » dans le logiciel Inkscape 46
Figure 45 Transformation du texte en Path. 47
Figure 46 Enregistrement du fichier au format SVG. 47
Figure 47 Enregistrement du fichier au format SVG. 48
Figure 48 Enregistrement du fichier au format SVG. 48
Figure 49 Choix d.u type d'opération (Operation). 49
Figure 50 Génération du G-code 49
Figure 51 Enregistrement du fichier G-code 50
Figure 52 Exécution du fichier sur la machine CNC 50

Problématique

Problématique

L'usinage du bois, de l'aluminium et des matières plastiques comprend une série d'étapes et d'opérations permettant de transformer ces matériaux en produits finis tels que les meubles, les portes, les fenêtres, etc. Parmi ces étapes, la conception et la planification occupent une place essentielle, car elles nécessitent une étude précise et une bonne maîtrise du design afin d'obtenir un produit conforme aux exigences souhaitées.

Cependant, l'opérateur peut rencontrer des difficultés lors des opérations de découpe et de façonnage de ces matériaux avec précision et qualité. De plus, ces travaux exigent un temps considérable ainsi qu'un effort physique et intellectuel important, ce qui entraîne une augmentation du coût de la main-d'œuvre.

Afin de réduire ces difficultés influençant la qualité du travail, le coût et la sécurité de l'opérateur, l'industrie est progressivement passée des systèmes manuels aux systèmes automatisés. Toutefois, l'importation de ces machines reste très coûteuse pour les artisans et les petites entreprises. C'est pour cette raison que nous avons décidé de réaliser un prototype réduit d'une machine CNC capable d'assister dans certaines opérations de fabrication à moindre coût.

Ainsi, la problématique posée est la suivante :

Peut-on concevoir et réaliser un prototype réduit d'une machine CNC commandée par ordinateur ?

Pour répondre à cette problématique, nous avons effectué une étude générale de la machine CNC et divisé les étapes de conception en trois parties principales : la mécanique, l'électronique et la programmation, tout en respectant le thème de notre projet intitulé :

« Étude, réalisation et simulation d'un prototype de machine CNC commandée par ordinateur ».

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, l'automatisation industrielle est devenue un élément essentiel dans les différents secteurs de production. Elle contribue à l'amélioration de la qualité des produits, à l'augmentation de la vitesse de production et à la réduction de l'intervention humaine dans les procédés industriels. Parmi les systèmes automatisés les plus répandus figurent les machines à commande numérique par ordinateur (CNC), qui ont révolutionné le domaine de la fabrication grâce à leur capacité à exécuter des opérations précises et répétitives avec une grande efficacité. [1]

Les machines CNC permettent de réaliser de nombreuses opérations industrielles difficiles à effectuer manuellement, telles que la découpe, le perçage, la gravure et l'usinage de haute précision. Elles constituent ainsi un outil indispensable dans les domaines de l'industrie mécanique, de la fabrication des moules, du travail du bois et du prototypage. De plus, ces machines offrent la possibilité d'être programmées et pilotées automatiquement, garantissant une qualité constante des produits tout en réduisant les erreurs humaines. [2]

Malgré les nombreux avantages offerts par les machines CNC commerciales, leur coût élevé ainsi que la difficulté de modifier certaines de leurs fonctionnalités logicielles constituent un obstacle pour de nombreux utilisateurs, notamment dans les domaines de l'enseignement, de la recherche et du développement. C'est pourquoi la conception et la réalisation d'une machine CNC à faible coût, basée sur des composants électroniques accessibles et faciles à programmer, représentent une solution intéressante.

Notre projet vise à étudier, concevoir, réaliser et simuler un prototype de machine CNC à trois axes. Les mouvements de ses axes sont assurés par trois moteurs pas à pas (Stepper Motors) commandés à l'aide d'une carte Arduino UNO et de pilotes de moteurs A4988. Le système repose sur le logiciel GRBL pour l'exécution des commandes G-Code et la gestion précise des déplacements des trois axes. [3]

La réalisation de ce projet nécessite la mise en œuvre de connaissances pluridisciplinaires en mécanique, en électronique et en programmation. Ainsi, la structure mécanique de la machine a été conçue, les composants électroniques adaptés ont été sélectionnés, puis le système de commande a été programmé afin d'assurer le bon fonctionnement de la machine et d'atteindre les performances souhaitées. [3]

Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente une étude générale des machines à commande numérique par ordinateur (CNC), leur principe de fonctionnement, leurs composants essentiels, leurs domaines d'application ainsi que leurs différentes classifications.
- Le deuxième chapitre est consacré à la conception du système proposé. Il traite les aspects mécaniques et électroniques, tout en présentant une étude détaillée de la commande des moteurs pas à pas à l'aide de la carte Arduino UNO et des drivers A4988.
- Le troisième chapitre concerne la partie pratique du projet. Il décrit les différentes étapes de réalisation et d'assemblage de la machine CNC, la configuration des logiciels nécessaires ainsi que les essais expérimentaux et l'analyse des résultats obtenus.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale présentant les principaux résultats obtenus ainsi

Chapitre I

Généralités

Sur les Machines CNC

I.1 Introduction

La fabrication moderne de précision ainsi que l'obtention d'un état de surface de haute qualité exigent une grande exactitude dimensionnelle . L'atteinte d'un tel niveau de performance par des méthodes manuelles s'avère extrêmement difficile, voire impossible, même pour des opérateurs hautement qualifiés. Dans les cas où cela reste envisageable, le temps de production est considérablement plus élevé en raison de la nécessité de contrôles dimensionnels répétés afin d'éviter toute surcoupe ou erreur d'usinag.

Il apparaît ainsi clairement que la commande automatique du mouvement s'est progressivement substituée à la commande manuelle dans l'industrie manufacturière moderne. Le développement de la commande numérique par ordinateur (CNC) a largement contribué à l'évolution technologique, à l'amélioration de la productivité ainsi qu'à la réduction du temps et des efforts dans de nombreux secteurs industriels .

Dans ce chapitre, une vue d'ensemble de la technologie CNC est présentée, incluant sa classification, sa structure ainsi que les principes de programmation des machines CNC pour différents types de commandes.

I.2 Aperçu historique de la CNC

La commande numérique est née en 1947 lorsque John C. Parsons, de la société Parsons située à Traverse City, spécialisée dans la fabrication de pales de rotors d'hélicoptères, s'est trouvé confronté à l'incapacité de produire ses modèles avec la rapidité requise. Il développa alors une méthode consistant à relier des équipements informatiques à un dispositif de suivi de gabarit. Son système fonctionnait à l'aide de cartes perforées permettant de piloter une machine-outil par des données numériques . [1]

En 1949, l'United States Air Force constata que les pièces destinées aux avions et aux missiles devenaient de plus en plus complexes. Les améliorations continues des plans techniques entraînaient des modifications fréquentes des conceptions. Dans la recherche de procédés de production plus rapides et plus efficaces, un contrat d'étude fut attribué à la société Parsons. Le Massachusetts Institute of technology (MIT), à travers son laboratoire de servomécanismes, intervint en tant que sous-traitant [1]

En 1951, le MIT reprit entièrement le projet et, en 1952, présenta avec succès un prototype fonctionnel de machine à commande numérique, basé sur une fraiseuse modifiée Cincinnati Hydrotel. Le terme « commande numérique » fut d'ailleurs introduit par cet institut

Au départ, la technologie CNC fut appliquée principalement aux tours, fraiseuses et autres machines réalisant un seul type d'opération d'usinage. Par la suite, l'évolution industrielle a nécessité l'usinage de pièces complexes requérant plusieurs opérations successives (fraisage, perçage, alésage, taraudage, etc.) au sein d'un même poste de travail. Cela a conduit au développement des centres d'usinage CNC capables d'exécuter plusieurs opérations de manière intégrée .

Initialement conçus pour la fabrication de composants prismatiques, ces centres ont ensuite évolué vers des machines destinées à la production de pièces cylindriques, communément appelées centres de tournage.

I.3 Définition de la commande numérique

La commande numérique constitue une forme d'automatisation programmable dans laquelle les équipements de fabrication sont pilotés par un programme spécifique à la pièce à produire. Ce programme se présente sous forme de données codées (chiffres, lettres et symboles) et, historiquement, était enregistré sur un support matériel tel qu'une bande perforée, lue par l'unité de commande de la machine.

Lorsqu'une nouvelle pièce doit être fabriquée, le programme correspondant est modifié en conséquence. Cette capacité d'adaptation rend les machines à commande numérique particulièrement adaptées à la production en petites et moyennes séries.

Les applications de la commande numérique s'étendent à de nombreux domaines tels que le fraisage, le tournage, la mesure, l'assemblage, ainsi que les opérations de gravure et de dessin. Le principe fondamental commun à ces systèmes repose sur le contrôle précis de la position de l'outil de gravure ou de dessin par rapport au motif à réaliser. Cette précision permet d'obtenir des tracés fidèles au modèle conçu et d'assurer une excellente qualité d'exécution. [1]

I.4 Définition d'une machine CNC

Une machine CNC (Computerized Numerical Control) est un équipement fonctionnant totalement ou partiellement de manière automatique, dont les instructions sont transmises sous forme de codes enregistrés sur des supports physiques tels que les disques ou les dispositifs USB.

Lorsqu'une machine est équipée d'un système de commande numérique capable d'effectuer des calculs de coordonnées pour définir une trajectoire de déplacement (par exemple lors d'une opération de contournage), elle est dite assistée par ordinateur et porte l'appellation CNC (Computerized Numerical Control).

La fonction principale d'une machine CNC consiste à assurer le contrôle précis des mouvements des différents axes et à exécuter les trajectoires programmées. Elle reçoit les commandes de fonctionnement ainsi que les données de position et de vitesse, puis les traite afin de générer des signaux de commande destinés aux moteurs. Cela permet de déplacer l'outil de gravure ou de dessin avec une grande précision conformément au modèle conçu. Elle se distingue par une capacité de calcul élevée et une grande flexibilité d'utilisation par rapport à l'automate programmable industriel.

Ce dernier complète la commande numérique en ce qui concerne la gestion des entrées telles que les capteurs, les interrupteurs, les boutons d'arrêt d'urgence, etc. En résumé, la commande numérique génère les mouvements conformément à des instructions numériques prédéfinies. [2]

I.5 Composants d'une machine CNC

Une machine CNC se compose essentiellement de deux parties principales:

- La partie opérative (ou partie mécanique).

- La partie commande (ou système de contrôle).

I.5.1 La partie opérative

La partie opérative représente la partie exécutive de la machine CNC. Elle regroupe l'ensemble des composants mécaniques et électromécaniques qui contribuent à la réalisation des mouvements requis et à l'exécution des opérations. Cette partie est constituée de la structure porteuse, du système mécanique des axes, du support de l'outil de gravure ou de dessin, de la table de travail ainsi que des moteurs assurant le déplacement des différents axes. Elle comprend également des dispositifs de détection et de mesure de position, tels que les capteurs et les codeurs, permettant de suivre en permanence la position de chaque axe, ainsi que des dispositifs de mesure de vitesse garantissant un contrôle précis du mouvement des moteurs et une amélioration des performances pendant le fonctionnement.

Le bâti assure la stabilité de la machine au sol, tandis que la structure comporte des glissières de grande précision, généralement réalisées en acier traité, garantissant un mouvement fluide et précis.

Le support d'outil s'adapte à la nature de l'opération à réaliser. Il peut s'agir d'une broche d'usinage, d'une torche, d'un laser, d'un jet d'eau sous pression ou de tout autre dispositif technologique selon l'application industrielle.

La plateforme de travail se déplace selon les axes X et Y, et éventuellement selon Z selon la conception. La précision des mouvements est assurée par un système de transmission, tandis que les moteurs entraînent les axes. Les capteurs de position surveillent en continu la position de chaque axe, et des dispositifs de mesure de vitesse angulaire améliorent le contrôle et la précision du système. [2]

I .5.2 La partie commande

La partie commande distingue la machine CNC d'une machine-outil conventionnelle. Elle se présente sous la forme d'une armoire électrique regroupant les principaux composants de pilotage, à savoir :

- Un clavier ou pupitre de commande permettant la saisie des instructions .
- Un dispositif de lecture de données (optionnel selon la configuration de la machine) .
- Un port de communication RS232 destiné à la connexion avec des équipements externes .
- Un écran d'affichage permettant la visualisation des données et des paramètres enregistrés .
- Un ordinateur industriel intégré .
- Des cartes électroniques assurant la gestion des axes, de la mémoire et des différentes fonctions de commande.

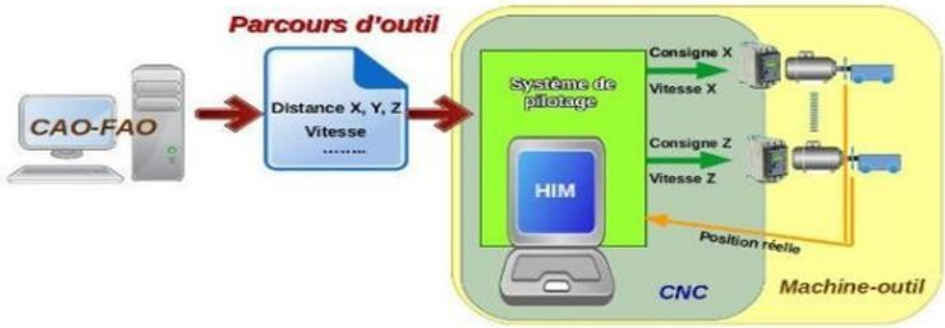


Figure 1 Commande numérique par contournage.

I.6 Domaine d'utilisation

Les machine CNC sont employées dans un large éventail de secteurs et d'industries, en raison de leur précision, de leur flexibilité et de leur capacité d'automatisation. Parmi les principales applications, on peut citer : [2]

I.6.1 Industrie manufacturiere

L'industrie manufacturière constitue l'un des principaux domaines d'application des machines à commande numérique par ordinateur (CNC). Elles sont utilisées pour fabriquer et produire des pièces et des composants de haute précision à partir de différentes matières premières telles que les métaux, les plastiques et le bois. Elles sont également largement employées dans plusieurs secteurs industriels, notamment l'automobile, l'aéronautique, les équipements mécaniques et l'électronique.

I.6.2 Menuiserie et travail du bois

Les machines CNC interviennent dans la production de meubles, de portes, de fenêtres et d'éléments décoratifs en bois. Elles permettent la découpe et la gravure avec une grande précision dimensionnelle.

I.6.3 Industries métallurgiques

Les machine CNC assurent le façonnage et la découpe des métaux, notamment pour la fabrication de pièces complexes, l'usinage de moules et le formage précis des matériaux métalliques **.**

I.6.4 Fabrication additive (impression 3D)

Certaine technologies dérivées du principe CNC sont utilisées pour la production d'objets tridimensionnels, permettant la réalisation de prototypes et de pièces complexes à partir de différents matériaux tels que les polymères et certains métaux .

I.6.5 Industrie plastique

Les machine CNC sont employées pour la découpe et le façonnage des matières plastiques afin de produire divers composants industriels .

I.6.6 Industrie du verre

Les machine CNC permettent la découpe, la gravure et le façonnage du verre, facilitant ainsi la fabrication de fenêtres, de portes et d'éléments décoratifs en verre.

I.6.7 Domaines artistiques .

Les machine CNC sont également utilisées dans la réalisation d'œuvres artistiques et de formes complexes, grâce à leur capacité à sculpter et à graver des matériaux avec une grande finesse de détail.

Avec l'évolution et l'expansion continues des technologies numériques, leur champ d'utilisation ne cesse de s'élargir, consolidant ainsi leur rôle fondamental dans l'industrie moderne.

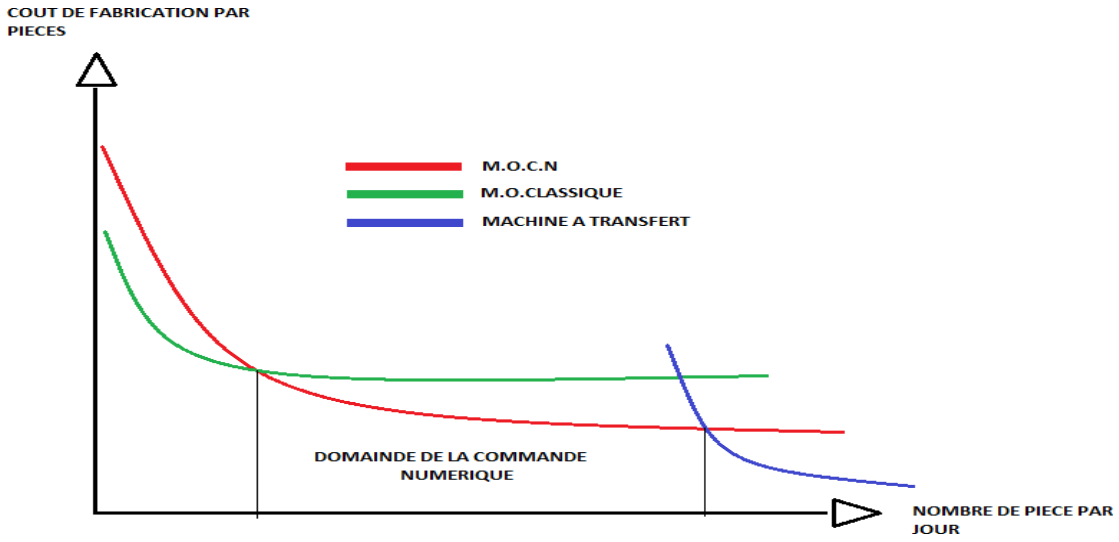


Figure 2 Domaine d'utilisation des M.O.C.N. [2]

La figure 2 représente le domaine d'utilisation des machines-outils à commande numérique (M.O.C.N.) en fonction du nombre de pièces produites par jour.

L'axe horizontal indique le nombre de pièces produites par jour, tandis que l'axe vertical représente le coût de fabrication par pièce.

La courbe verte correspond aux machines-outils classiques (M.O. classique). Elles sont adaptées à la production de petites séries, car leur coût d'investissement est relativement faible. Cependant, le coût de fabrication par pièce reste presque constant lorsque la quantité produite augmente.

La courbe rouge représente les machines-outils à commande numérique (M.O.C.N.). Bien que leur coût initial soit plus élevé en raison de la programmation et de la mise en œuvre, leur coût de fabrication diminue avec l'augmentation du nombre de pièces produites. Elles sont donc particulièrement adaptées aux productions moyennes nécessitant précision et flexibilité.

La courbe bleue correspond aux machines à transfert, caractérisées par un investissement très important. Elles deviennent rentables uniquement pour les très grandes séries de production, où le coût unitaire devient très faible.

La zone indiquée comme « Domaine de la commande numérique » montre que les machines CNC constituent la solution la plus économique pour les productions de séries moyennes. Elles offrent un compromis optimal entre la flexibilité des machines classiques et la productivité élevée des machines à transfert.

I.7 Types de machines CNC

On distingue plusieurs types de machines CNC selon leur domaine d'application :[2]

I.7.1 Machines d'enlèvement de matière (usinage par copeaux)

telles que les perceuses, les tours, les centres de tournage, les tours verticaux, les centres d'usinage et les fraiseuses, entre autres.

I.7.2 Machines d'électroérosion

notamment les machines d'enfonçage et les machines à fil.

I.7.3 Machines de découpe

- **Presses** : incluant les presses pour le formage des métaux et les machines d'injection plastique.

- **Machines spéciales** : telles que les machines pour le travail des tôles, les machines à têtes multiples, les machines de conditionnement (notamment pour l'industrie agroalimentaire), etc.

I.8 Classification des machines CNC

Les machines à commande numérique par ordinateur peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment : [2]

- Le mode de fonctionnement de la machine.
- Le mode ou procédé de fabrication.

I.8.1 Classification des systèmes CNC selon le mode de fonctionnement

A- Fonctionnement en boucle ouverte

Le système en boucle ouverte (Open-Loop System) est un mode de commande dans lequel les actions sont exécutées sans contrôle continu du résultat ou des variations du processus. Dans ce type de système, une séquence prédéfinie d'instructions est réalisée sans retour d'information effectif sur la sortie réelle ni intervention corrective immédiate

Dans le fonctionnement en boucle ouverte, comme illustré à la Figure 3, le déplacement du chariot est réalisé, mais il n'est pas contrôlé par un système de rétroaction permettant de vérifier ou de corriger la position obtenue .

.

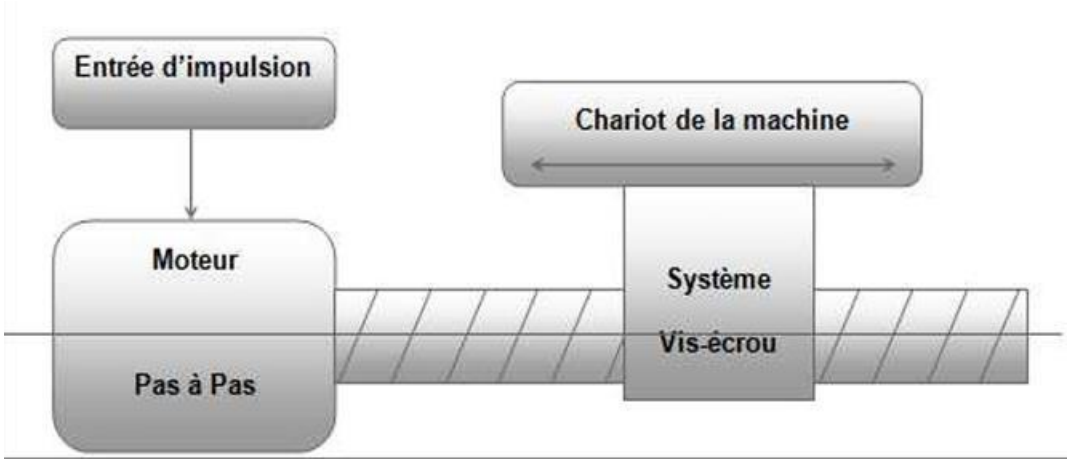


Figure 3 Fonctionnement en boucle ouvert. [1]

B- Fonctionnement en boucle fermée

Le processus en boucle fermée (Closed-Loop Process) constitue un système de commande automatique assurant la surveillance et la régulation continues d'un procédé donné. Ce type de système repose sur une mesure permanente des variables de fonctionnement ainsi que sur l'ajustement du signal de commande en fonction des valeurs réellement mesurées en temps réel.

Dans un système en boucle fermée, le mouvement ou la position est contrôlé jusqu'à ce que les valeurs programmées correspondent aux valeurs effectivement mesurées. Toute différence (erreur) entre la consigne et la valeur réelle est détectée, puis corrigée automatiquement par le système de rétroaction (feedback).

Ce principe garantit une grande précision et une correction continue des écarts, ce qui améliore la qualité d'usinage et la fiabilité du processus. Comme illustré à la figure 4 :

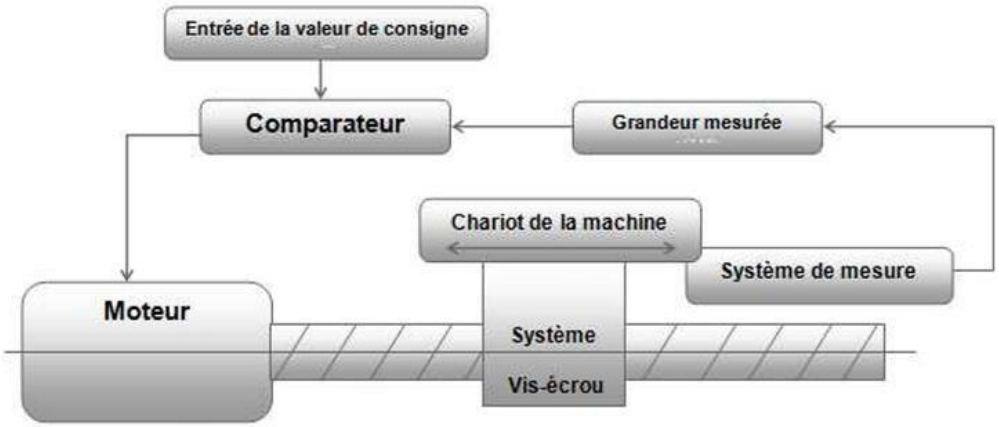


Figure 4 Commande en boucle fermée.

I.8.2 Classification des machines CNC selon le mode de fabrication

Les machines à commande numérique peuvent être classées, selon le mode de fabrication, en trois catégories principales :

- La commande numérique point à point .
- La commande numérique par contournage .
- La commande numérique par axe.

A- Commande numérique point à point [2]

La commande numérique point à point (Point-to-Point CNC Control) est un type de système dans lequel la machine se déplace vers des positions prédéterminées avec précision, sans contrôle du trajet intermédiaire. L'outil est amené avec exactitude à une position donnée, puis l'opération d'usinage est exécutée uniquement à ce point.

Dans ce mode de fonctionnement, seule la position finale est contrôlée, tandis que le chemin parcouru entre deux points successifs n'est pas pris en considération.

Exemples d'opérations d'usinage :

-Perçage ; Fraisage ponctuel ; Alésage ; Taraudage ; Micro-alésage ou finition locale.

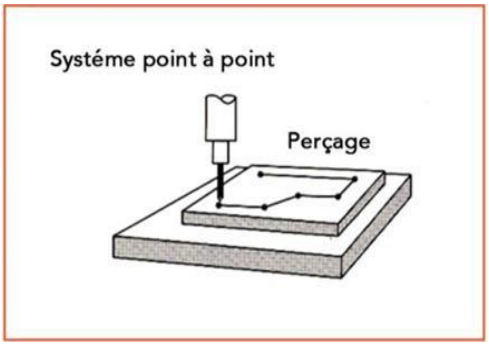


Figure 5 Commande numérique point à point.

C- Commande numérique par axe [2]

La commande numérique par axe (Axis CNC Control) constitue un mode de fonctionnement dans lequel le déplacement s'effectue suivant un seul axe à la fois. Ce type de commande est utilisé dans les applications nécessitant un mouvement linéaire ou rotatif contrôlé le long d'un axe unique afin de façonner la pièce.

Dans ce système, les axes ne sont pas interpolés simultanément ; chaque mouvement est réalisé indépendamment selon l'axe sélectionné. Ce mode est particulièrement adapté aux opérations simples ne nécessitant pas de trajectoires complexes.

Exemples d'opérations d'usinage :

-Tournage ;Fraisage linéaire ;Alésage.

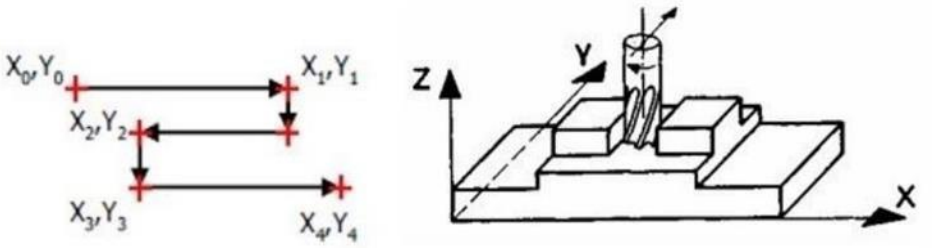


Figure 6 Commande numérique par axe.

D- Commande numérique par contournage [2]

La commande numérique par contournage (Contouring CNC Control) est un type de système permettant le déplacement continu et simultané de plusieurs axes suivant une trajectoire complexe prédéfinie. Ce mode de commande assure une interpolation coordonnée des axes, garantissant un mouvement fluide et précis de l'outil le long du profil à usiner.

Ce système est particulièrement adapté aux applications nécessitant des mouvements continus et une grande précision pour la réalisation de formes géométriques complexes et de surfaces élaborées.

Exemple d'opérations d'usinage **:**
Toute opération réalisable sur un centre d'usinage ou un centre de fabrication, notamment le fraisage de surfaces complexes, le profilage tridimensionnel et l'usinage de cavités.

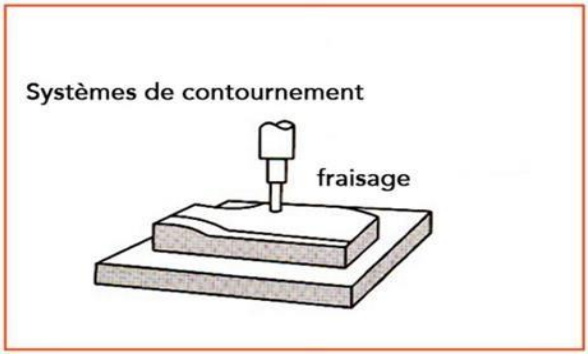


Figure 7 Commande numérique par contournage.

I.9 Systèmes d'une machine CNC

Le système d'une machine CNC peut être subdivisé en trois parties principales : le système mécanique, le système électronique et le système logiciel.

La partie mécanique reçoit les signaux de commande émis par le système électronique et assure l'entraînement des moteurs nécessaires à la réalisation des mouvements.

Le système électronique, quant à lui, reçoit une instruction ou un ensemble d'instructions provenant du système logiciel (programme d'usinage) et génère les signaux de commande destinés au système mécanique.

I.9.1 Le système électronique

Le système électronique est chargé de produire les signaux de commande destinés aux moteurs qui pilotent le déplacement de l'outil de coupe selon les différents axes.

Il se compose généralement des éléments suivants :

1. Une alimentation électrique.
2. Une carte microcontrôleur.
3. Une carte de commande des moteurs pas à pas.

I.9.2 Le système mécanique

Le système mécanique est assemblé de manière à permettre le déplacement des trois axes au moyen de rails linéaires et de paliers linéaires montés avec précision. Des moteurs sont installés sur chaque axe et fonctionnent conformément aux signaux de commande générés par le système électronique.

Chaque moteur est couplé à une vis sans fin (ou vis de transmission) associée à l'axe correspondant, permettant de transformer le mouvement de rotation du moteur en un mouvement linéaire.

Le déplacement précis de chaque axe est directement lié au contrôle de la rotation du moteur. De même, la vitesse de déplacement peut être ajustée par la régulation de la vitesse du moteur, via l'envoi des signaux de commande appropriés.

Ainsi, la trajectoire de l'outil fixé à l'organe terminal de chaque axe est contrôlée avec précision afin d'agir sur la pièce à usiner.

Afin d'éviter tout dépassement de la zone de travail définie, des interrupteurs de fin de course (limit switches) sont installés sur chaque axe. Un bouton d'arrêt d'urgence manuel est également prévu pour garantir la sécurité de fonctionnement de la machine.

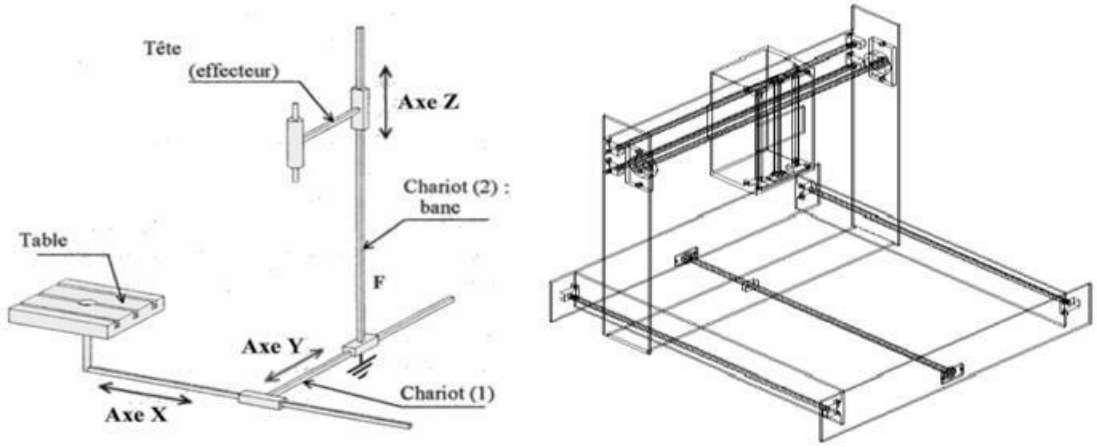


Figure 8 Structure mécanique d'une machine CNC. [2]

I.9.3 Le système logiciel

La pièce à usiner sera conçue à l'aide de l'ordinateur (CAO), où un dessin est généré dans l'un des formats acceptés. Ce dessin est ensuite introduit dans le logiciel d'aide à la fabrication assistée par ordinateur (FAO), où un code lisible par la machine utilisée pour le contrôle numérique est produit. Après l'exécution du code Gcode, il est nécessaire de tester différentes options d'interpréteurs Gcode open source pour Arduino, afin d'obtenir des mouvements corrects des axes de la machine via le programme de commande du moteur.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude générale de la machine à commande numérique par ordinateur (CNC) ainsi que l'importance de chacune de ses parties. Nous avons également abordé les commandes les plus utilisées et les différentes classifications des machines CNC. Nous pouvons à présent passer à l'étape suivante, qui consiste à présenter la phase de conception.

Chapitre II

Conception

d’une

machine CNC

II. Conception d'une machine CNC

II.1 Introduction

Les technologies informatiques ont connu une évolution considérable, permettant aujourd'hui la réalisation des machines CNC à faible coût grâce à la disponibilité de composants de base tels que les microcontrôleurs embarqués de type Arduino et les cartes de puissance. Par conséquent, le temps nécessaire à la conception et au développement de prototypes a été significativement réduit.

L'utilisation d'un système de commande basé sur une carte Arduino contribue à faciliter la conception et la réalisation d'un prototype de machine CNC à trois axes.

II.2 Cahier des charges

Notre projet porte sur la conception et la réalisation d'une machine à commande numérique par ordinateur (CNC), plus précisément une machine de perçage et de fraisage tridimensionnelle à trois axes, de petite taille. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'études.

Le cahier des charges décrit les spécifications du système selon les aspects techniques, économiques et fonctionnels. Il définit l'ensemble des exigences auxquelles doit répondre le produit conçu.

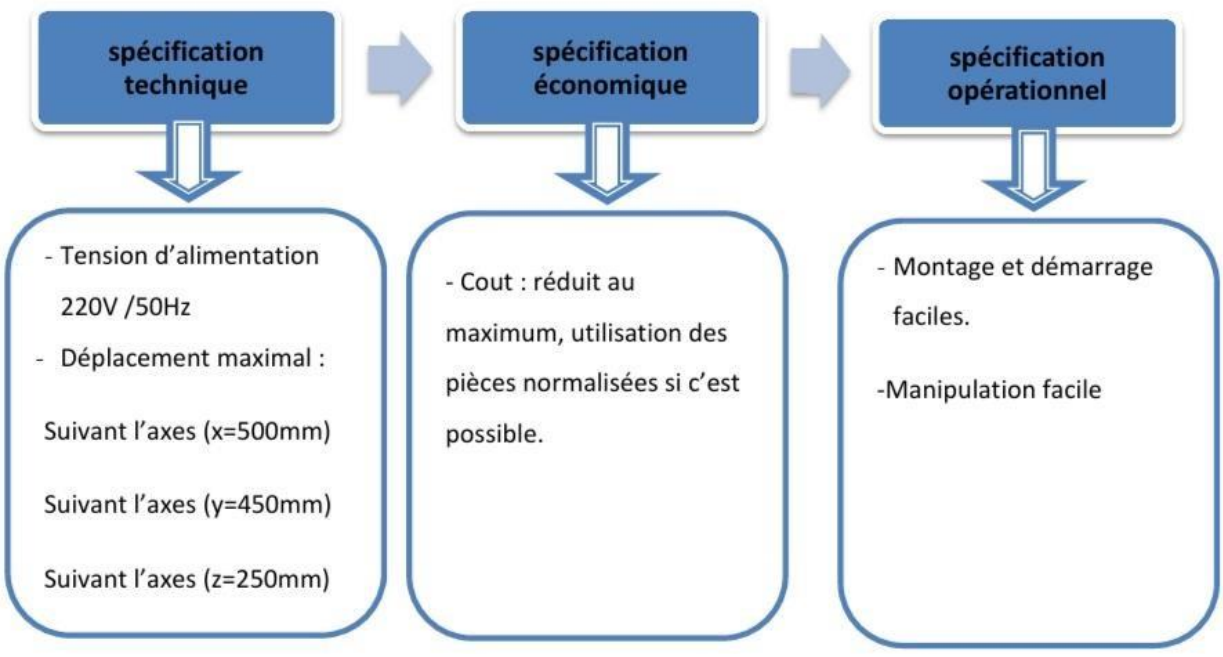


Figure 9 Spécifications de la machine.

II.2.1 Fonction principale

La fonction principale de notre machine à commande numérique par ordinateur consiste à usiner des matériaux tendres tels que le bois, le plastique et l'aluminium. En revanche, elle n'est pas conçue pour l'usinage de matériaux durs tels que l'acier.

II.2.2 Fonctions secondaires

La machine assure quatre fonctions secondaires principales :

- Le guidage des axes (X, Y et Z).
- La modification des coordonnées selon les axes.
- Le système de fixation de la pièce à usiner.
- La partie commande.

II.3 Fonctions complémentaires proposées :

Le diagramme suivant présente l'ensemble des variables nécessaires à la réalisation des différentes fonctions du système.

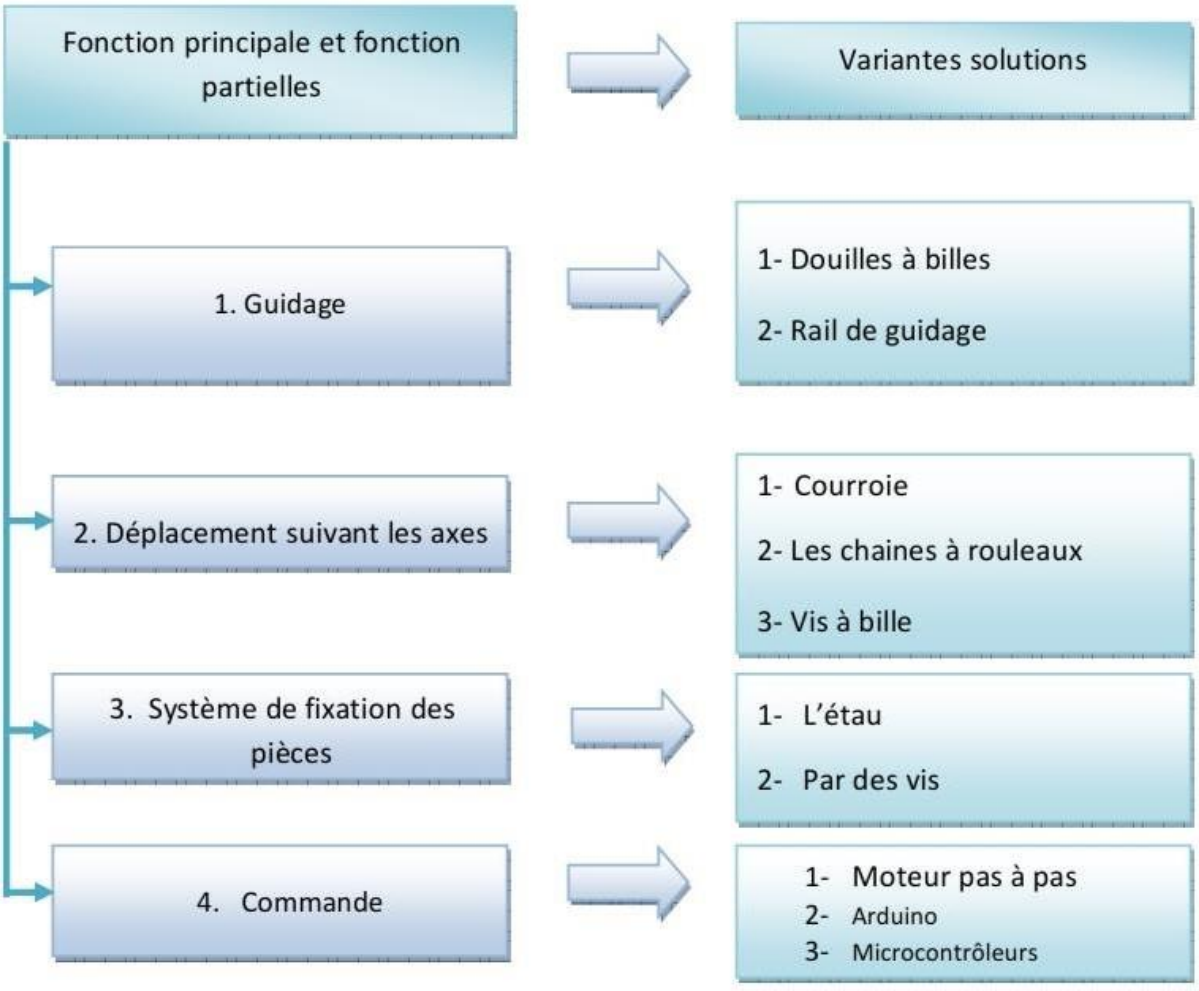


Figure 10 Variables de la machine. [1]

II.4 Structure générale d'une machine CNC à trois axes

Le système d'une machine CNC à trois axes est constitué de trois parties principales : la partie mécanique, la partie électronique ainsi que la partie logicielle et la programmation.

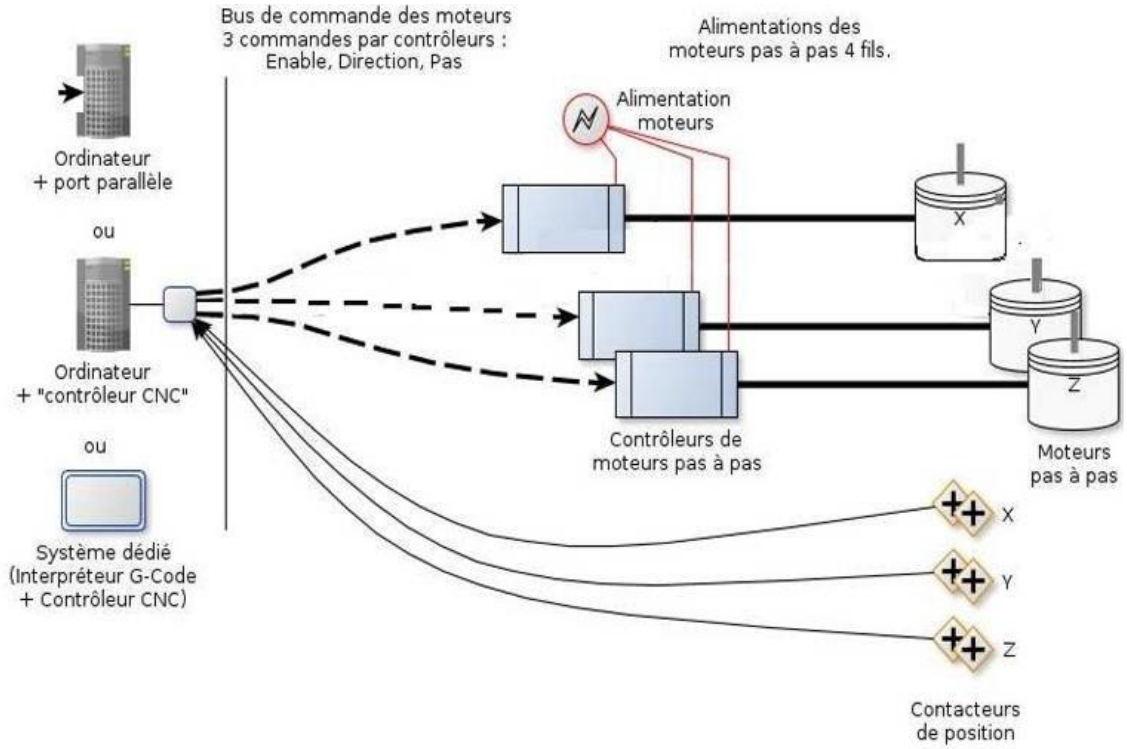


Figure 11 Schéma théorique d'une CNC 3 axes. [1]

II.4.1 La partie mécanique

Cette partie a pour objectif de définir les dimensions des différents composants constituant la machine, afin d'assurer sa stabilité ainsi qu'un fonctionnement correct et efficace.

II.4.2 Système de guidage

Les douilles à billes sont utilisées pour le guidage linéaire dans les applications nécessitant un mouvement précis et sans jeu. Elles permettent d'améliorer les performances tout en réduisant le coefficient de frottement.

Ces dispositifs sont largement employés dans les machines-outils, les robots ainsi que les systèmes automatisés. Ils peuvent atteindre des vitesses de déplacement allant jusqu'à 5m/s, tout en restant une solution économique.

Par ailleurs, cette douille est généralement associée à un roulement angulaire, pouvant être réalisé à l'aide d'une autre douille montée sur un arbre parallèle. Cet ensemble constitue un système complet empêchant toute rotation autour de son axe et garantissant ainsi un guidage linéaire stable et précis. [1]

Déplacement selon l'axe Z

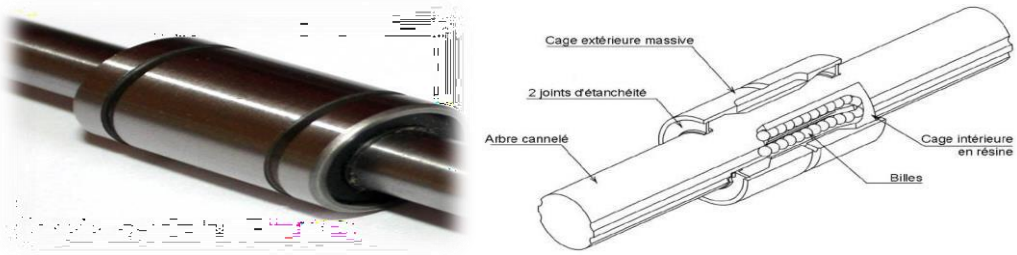


Figure 12 Douilles à billes.

II.4.3 Rail de guidage

Le rail de guidage est une structure ou une barre utilisée pour orienter et guider le mouvement linéaire d'un élément ou d'un outil le long d'une trajectoire déterminée. Les rails de guidage sont largement employés dans diverses applications industrielles et mécaniques nécessitant un déplacement linéaire précis.

Ils existent sous différentes formes et dimensions et peuvent être fabriqués à partir de plusieurs matériaux tels que l'acier, l'aluminium ou encore certains polymères techniques.

La fonction principale du rail de guidage consiste à assurer le déplacement précis et fluide de l'élément ou de l'outil suivant un trajet défini. Des guides et des roulements sont montés sur le rail afin de permettre un mouvement régulier et à faible frottement le long de celui-ci. [2]

Translation sur les axes X et Y :



Figure 13 Douilles à billes.

II.5 Système de transformation du mouvement

II.5.1 Système vis–écrou

Le système vis–écrou permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation grâce à l'association d'une vis filetée et d'un écrou (liaison hélicoïdale).



Figure 14 Système vis–écrou.

II.5.2 Accouplement

L'accouplement est un dispositif mécanique permettant de relier deux arbres rotatifs afin d'assurer la transmission du couple.

Il existe plusieurs types d'accouplements, notamment les accouplements dits semi-flexibles**,** qui permettent de compenser de faibles défauts d'alignement, généralement dus aux tolérances de fabrication ou de montage.

Ces accouplements sont généralement constitués de deux parties rigides fixées aux arbres, reliées par un élément légèrement flexible permettant d'absorber les défauts d'alignement tout en garantissant une transmission efficace du mouvement et du couple. [3]



Figure 15 Accouplement semi-flexible. [3]

II.6 Conception et calculs dimensionnels

Les éléments fonctionnels de la machine doivent être déterminés conformément aux dimensions suivantes :

La vis et l'écrou (vis trapézoïdale).

Les roulements .

Les douilles à billes .

Les axes de guidage .

Les accouplements semi-élastiques.

II.6.1 Détermination des masses

Avant d'entamer l'étude, il est nécessaire de calculer la masse de chaque élément constituant la machine (Figure 16). Deux types de pièces ont été considérés : les pièces standardisées et les pièces à usiner.

Les masses des pièces standardisées ont été extraites à partir des catalogues des fournisseurs, tandis que les masses des pièces à fabriquer ont été estimées à l'aide du logiciel de conception SolidWorks 2012**.** [1]

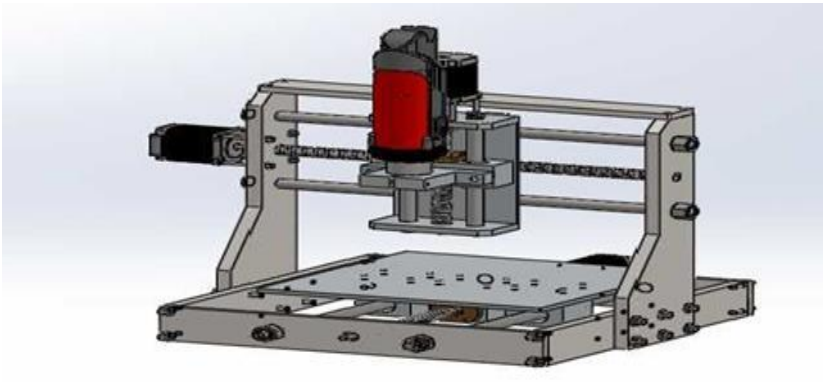


Figure 16 Modèle tridimensionnel de la machine.

Déplacements	**Nom de pièce**	**Masse (g)**
Direction Z	Mini perceuse	300
	Paliers à douilles à billes	200
	Porte outil	200
	Vis trapézoïdale + écrou	250
	Support porte outil	500
	Axes de guidages	450
	Moteur	350
Direction Y	Paliers à douilles à billes	450
	Vis trapézoïdale + écrou	400
	Axes de guidages	1000
	Moteur	350
Direction X	Paliers à douilles à billes	500
	Vis trapézoïdale + écrou	400
	Axes de guidages	1000
	Le plateau de travail	2400
	Moteur	350

Tableau II-1: Masses des pièces utilisées dans la conception.

II.6.2 Conception des vis hélicoïdales

A. Rendement du système vis–écrou [1]

Calcul du rendement :

$\eta=(1*f*tg\alpha)\div(1*(f/tg\alpha))$

Avec f=0.18 et α=5.2

f= coefficient de sécurité

α :L'angle de l'hélice

On trouve

$\eta=0.33$

B. Conception de la vis de transmission selon l'axe Z [1]

F est la charge appliquée

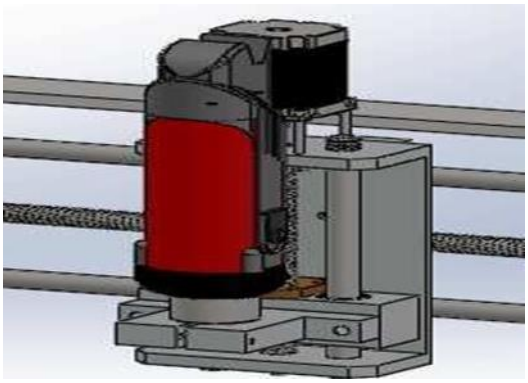


Figure 17 Système de déplacement selon l'axe Z.

II.6.3 Charge appliquée sur la vis de l'axe Z [1]

La charge appliquée sur la vis trapézoïdale de l'axe Z est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$F(z)=(m\times g)+(m\times\gamma)+F$

p où :

γ : accélération du système ; Fp : effort de pénétration (effort de coupe) ; g : accélération de la pesanteur ; m : masse totale des éléments appliqués sur la vis.

L'effort de pénétration est donné par :

$Fp=1/3Fc$

où :

Fc: effort de coupe ; Kc : coefficient spécifique de coupe ;a: profondeur de passe (mm) .

fa: avance (mm/tr) ; Kc= 80daN/mm²=800N/mm² a=0.3mm fa= 0.4mm

d'où Fc= a×fa×Kc

Fc=0.3*800*0.4 Fc=96 N

Fc=0.3*800*0.4 Fc=96 N

Fp=1/3Fc = 96/3 Fp=32N

$\alpha=\Delta v/\Delta t$ On suppose que $\Delta =0.01s$

et

v=1000tr/min

v=66.66mm/s

v=0.06m/s

donc

$\alpha=0.06/0.1 \Rightarrow \alpha=0.6m/s^2$

m = m1+m2+m3=700 g

Avec: (mi) sont l'ensemble des masses sur la vis et (g) est la gravitation. Après le calcule on trouve :

F(z)=39,29N

b. Le couple nécessaire

Il est donné par la formule suivante :

$Cz=(Fz*p)/(2*\eta*\Pi*1000)$

p= pas de la vis

p= 4 mm

Cz=(46 ,12*4)/(2*3,14*0 ,33*1000) ⇒ Cz=0,089N.m

c. La puissance nécessaire :

$Pz=C*\omega$

$\omega= (2*\Pi*v)/60$

$\omega=(2*3.14*1000)/60$

ω=104.66rd/s

Pz=0,089*104,66

pz=9,31 watt

II.6.4 Conception de la vis trapézoïdale selon l'axe Y

F est la charge appliquée

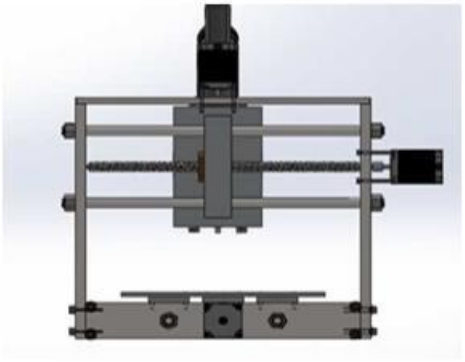


Figure 18 Système de déplacement selon l'axe Z.

A. Charge appliquée sur la vis de l'axe Y

La charge appliquée sur la vis de l'axe Y est calculée de la même manière que celle utilisée pour l'axe **Z**.

II.6.5 Conception de la vis trapézoïdale de l'axe X

F représente la charge appliquée sur la vis.

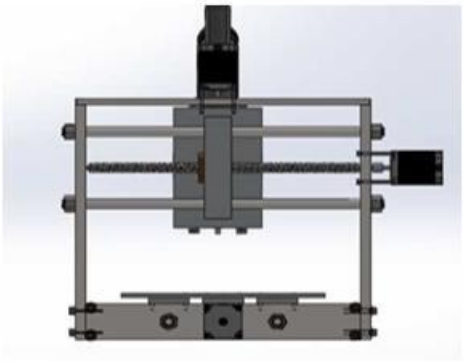


Figure 19 Système de déplacement selon l'axe Y.

A. Charge appliquée sur la vis de l'axe X

La charge appliquée sur la vis trapézoïdale de l'axe **X** est également calculée de la même manière que précédemment.

II.7 Moteur et partie électronique

Cette partie regroupe plusieurs composants électroniques qui apparaissent dans le schéma synoptique suivant.

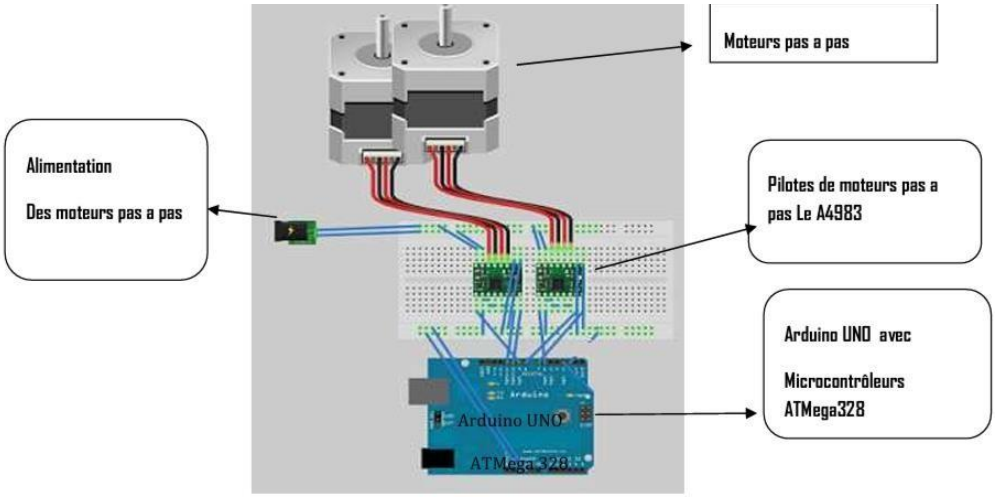


Figure 20 Partie électronique.

II.7.1 Les moteurs pas à pas

Le moteur pas à pas est un convertisseur électromécanique destiné à transformer un signal électrique (impulsion ou train d'impulsions de commande) en un mouvement mécanique (angulaire ou linéaire).

Du point de vue électrotechnique, il présente des similitudes avec une machine synchrone. Le stator, généralement à pôles saillants, comporte les enroulements de commande, tandis que le rotor, également à pôles saillants, peut être soit équipé d'aimants permanents (structure active), soit constitué d'un matériau ferromagnétique denté (structure passive).

Entre le moteur et son alimentation, trois éléments fondamentaux sont généralement interposés (Figure 20) [1] :

- Une unité de commande assurant la génération des impulsions de pilotage .
- Un modulateur PWM (Pulse Width Modulation) permettant de générer les signaux de commande des interrupteurs électroniques .
- Une électronique de puissance assurant l'alimentation des enroulements du moteur à partir de la source d'énergie.

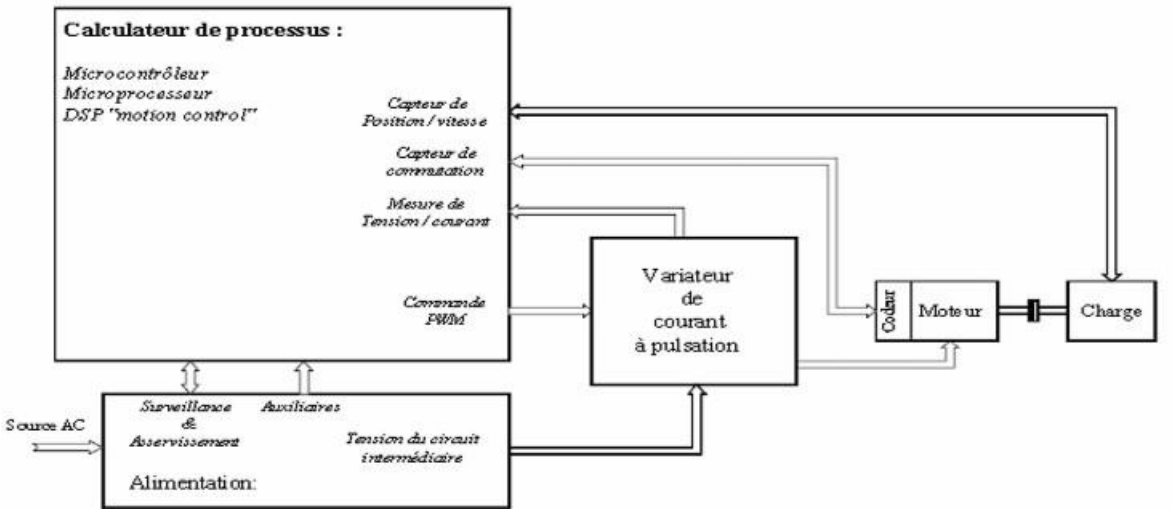


Figure 20: Schéma de principe de commande d'un moteur pas à pas.

L'alimentation de chaque enroulement du moteur par une tension donnée engendre un courant qui produit un champ magnétique orienté avec précision. La commutation séquentielle des tensions appliquées aux différents enroulements permet de déplacer la position du champ magnétique du stator selon un incrément élémentaire appelé pas.

En d'autres termes, chaque configuration de tension aux bornes des enroulements correspond à une position stable du rotor. Une séquence bien définie de commutations de tension entraîne ainsi un déplacement du rotor correspondant à un nombre équivalent de pas.

Lorsque ces commutations sont effectuées à une fréquence donnée, elles génèrent un champ magnétique tournant au niveau du stator, permettant un déplacement en pas entier, demi-pas ou micro-pas.

Le mouvement discret du champ dans l'entrefer est suivi par le rotor, qui est soumis à un couple synchrone. La nature de ce couple dépend des interactions suivantes :

· Interaction entre le champ statorique et le matériau ferromagnétique du rotor, dans le cas d'un rotor à structure dentée passive .

· Interaction entre le champ tournant et le champ magnétique du rotor, lorsque celui-ci est équipé d'aimants permanents .

· Combinaison des deux interactions précédentes.

Les moteurs pas à pas les plus utilisés peuvent être classés selon le nombre de pas par tour comme suit [1] :

· **0,9°** (soit 400 pas par tour) .

· **1,8°** (soit 200 pas par tour) .

· **15°** (soit 24 pas par tour).

Les moteurs pas à pas présentent une très grande précision et une durée de vie quasi illimitée, l'usure mécanique étant pratiquement inexistante et ils existent en différentes tailles qui varient entre 1cm et plus d'une dizaine de centimètre. Tout dépendra des applications dans ils seront utilisées.

A. Les différents types de moteurs pas à pas [4]

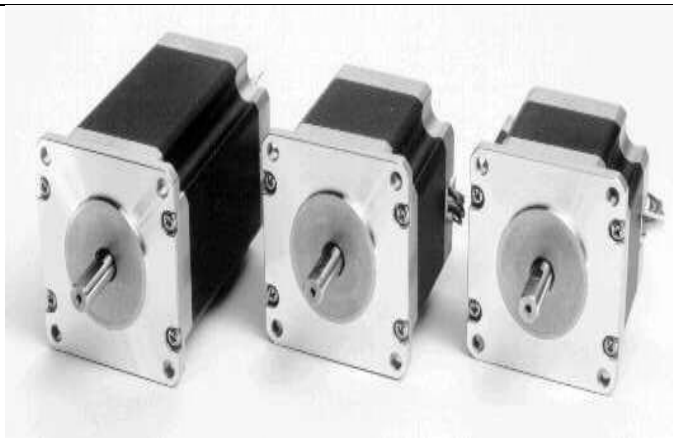
	**Les moteurs pas à pas peuvent être classés comme suit :**
	-Permanent Magnet Stepper Motors
	-Variable Reluctance Stepper Motors
	-Hybrid Stepper Motors

Figure 21 Différents types de moteurs pas à pas.

B. Comparaison des 3 types de moteurs

Comparaison des performances des 3 types de moteurs pas à pas			
Types de moteurs	Moteur a aiment permanent	Moteur a reluctance variable	Moteur hybride
Résolution (nbr de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Elevé
Couple moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : -du sens du courant pour le moteur bipolaire –de l'ordred'alimentation des bobines	Il dépend : uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : -du sens du courant - de l'ordre d'alimentation des bobines
Fréquence de travaille	Faible	Grande	Grande

Le moteur hybride a été choisi pour notre projet, car il constitue la solution la plus adaptée parmi les différents types de moteurs disponibles, grâce à sa précision et à son efficacité dans le

contrôle du mouvement.

C. Étude des moteurs pas à pas hybrides

Les moteurs hybrides combinent le principe de fonctionnement des moteurs à aimants permanents et celui des moteurs à réluctance variable, en réunissant ainsi les avantages de ces deux technologies.

Le rotor est constitué de deux disques dentés décalés mécaniquement l'un par rapport à l'autre, entre lesquels est inséré un aimant permanent. Ce type de moteur se distingue par un couple plus élevé, une vitesse supérieure ainsi qu'une grande précision, généralement comprise entre 100 et 400 pas par tour**.**

correspondante, la présence d'un rotor aimanté (magnétisé) présente un avantage significatif. En effet, lorsque l'alimentation d'un enroulement (par exemple l'enroulement vert) est coupée et qu'un autre enroulement (par exemple l'enroulement rose) est alimenté, l'absence d'aimantation du rotor ne permettrait pas de contrôler le sens de rotation, puisque les dents seraient attirées de manière identique.

En revanche, avec un rotor magnétisé, il devient possible de sélectionner précisément la dent attirée en contrôlant le sens du courant dans l'enroulement, ce qui permet un contrôle efficace et précis du sens de rotation.

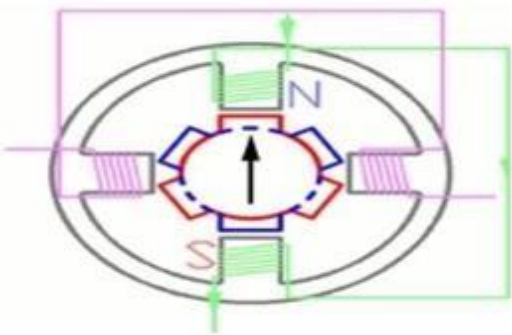


Figure 22 Avantage de la présence d'un rotor aimanté. [3]

II.7.2 Commande des moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas peuvent être commandés soit par une alimentation à courant constant, soit par d'autres méthodes de commande. L'alimentation à courant constant est couramment utilisée pour les faibles vitesses, bien qu'elle puisse entraîner une dissipation énergétique relativement élevée.

Elle est particulièrement adaptée à la commande des moteurs bipolaires et permet d'obtenir un couple important.

Dans notre projet, nous avons opté pour une alimentation à courant constant afin de réduire la consommation énergétique tout en assurant un couple élevé.

Le contrôle des moteurs pas à pas est assuré par des dispositifs appelés drivers. Parmi ces derniers, nous avons choisi le driver A4988, adapté à notre conception.

a. Commande des moteurs pas à pas à l'aide du A4988

Le module A4988, développé par la société Allegro Microsystems, est une carte de commande simple d'utilisation destinée aux moteurs pas à pas.

Ce driver offre une fonctionnalité de limitation du courant ainsi que plusieurs modes de micro-pas (jusqu'à cinq résolutions différentes). Il fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 8 V et 35 V et peut fournir un courant allant jusqu'à 2 A par phase.

Il permet ainsi de piloter efficacement un moteur pas à pas bipolaire avec une précision et une flexibilité élevées.



Figure 23 Drivers de moteurs pas à pas.

Parmi les principales caractéristiques du driver, on peut citer : [4]

1. Une interface de commande simple basée sur les signaux Step/Direction .

2. Cinq modes de résolution de pas : pas entier, demi-pas, quart de pas, huitième de pas et seizième de pas .

3. Une limitation de courant réglable permettant de définir le courant maximal de sortie à l'aide d'un potentiomètre, facilitant ainsi l'adaptation aux caractéristiques du moteur .

4. Un contrôle intelligent de la commutation sélectionnant automatiquement le mode de décroissance du courant (current decay) .

5. Des protections intégrées contre la surchauffe et les surintensités.

b. Connexions électriques :

Le driver nécessite une alimentation logique comprise entre 3 V et 5,5 V, connectée entre les bornes VDD et GND, ainsi qu'une alimentation de puissance pour le moteur comprise entre 8 V et 35 V, à connecter entre les bornes VMOT et GND.

Ces alimentations doivent être associées à des condensateurs de découplage appropriés, placés à proximité du circuit, et capables de fournir les courants requis (avec des pointes pouvant atteindre 4 A pour l'alimentation du moteur).

Les signaux de sélection (MS1, MS2, MS3) permettent de choisir parmi cinq niveaux de résolution de micro-pas, conformément au tableau correspondant. Les entrées MS2 et MS3 disposent

de résistances internes de 100 kΩ, tandis que MS1 ne possède pas de résistance interne et doit donc être connecté à l'extérieur.

Afin d'assurer un fonctionnement correct en mode micro-pas, il est nécessaire de régler la limite de courant à une valeur suffisamment faible pour garantir un contrôle précis du courant. Dans le cas contraire, les niveaux intermédiaires de courant ne seront pas correctement maintenus, et le moteur fonctionnera effectivement en mode pas complet



Figure 24 Schéma de câblage du driver du moteur pas à pas. [1]

c. Signaux de commande

Chaque impulsion appliquée à l'entrée STEP correspond à un micro-pas du moteur pas à pas, selon le sens de rotation défini par l'entrée DIR.

Il est important de noter que les broches STEP et DIR ne sont pas polarisées en interne. Par conséquent, aucune de ces entrées ne doit rester flottante dans notre application.

Dans le cas où un seul sens de rotation est requis, l'entrée DIR peut être directement reliée à VCC ou à GND.

II.8 Carte Arduino UNO

La carte Arduino UNO, développée par la société Arduino, est une carte électronique basée sur un microcontrôleur ATmega328P de la famille AVR. [1]

Ce microcontrôleur est un dispositif 8 bits fonctionnant à une fréquence de 16 MHz, programmable en langage C/C++.

L'un des principaux avantages des cartes Arduino (ainsi que des autres modèles disponibles) réside dans leur simplicité d'utilisation. La société Arduino propose un environnement de développement intégré basé sur des outils open source, facilitant ainsi la programmation et le téléchargement des programmes vers la mémoire du microcontrôleur via une connexion USB.

De plus, l'environnement Arduino fournit des bibliothèques prêtes à l'emploi permettant de gérer facilement les fonctions courantes telles que :

- la gestion des entrées/sorties numériques et analogiques .
- l'utilisation du convertisseur analogique/numérique (ADC) .
- la génération de signaux PWM .
- la communication via bus TWI/I²C .

- le contrôle des servomoteurs, etc.

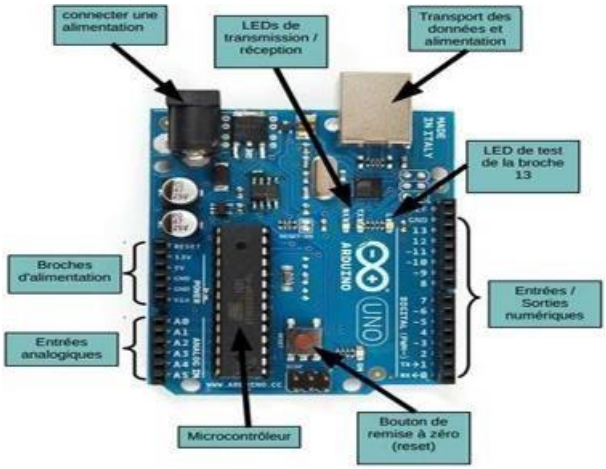


Figure 25 Carte Arduino UNO.

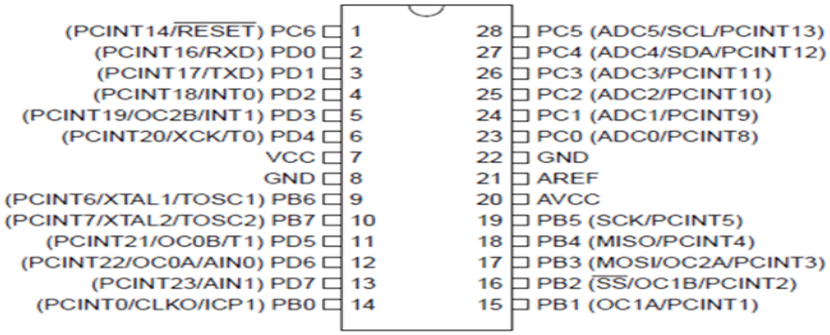


Figure 26 Brochage du ATmega328.

II.8.1 Raisons du choix de la carte Arduino

Le choix de la carte Arduino UNO dans notre projet repose sur plusieurs avantages techniques et économiques, parmi lesquels :

- Coût réduit : les cartes Arduino présentent un coût relativement faible comparé à d'autres plateformes de développement. Même les versions préassemblées restent accessibles, généralement à un prix inférieur à 25 euros .

- Compatibilité multiplateforme : le logiciel Arduino, développé en langage Java, fonctionne sous les systèmes d'exploitation Windows, macos et Linux, contrairement à certains environnements limités à une seule plateforme .

- Environnement de programmation simple et intuitif : l'IDE Arduino est particulièrement adapté aux débutants tout en restant suffisamment flexible pour les utilisateurs avancés ;

- Logiciel open source et extensible : l'environnement de développement ainsi que le langage Arduino sont distribués sous licence open source, permettant leur amélioration et leur extension par la communauté .

• Matériel open source et évolutif : les cartes Arduino sont basées sur des microcontrôleurs de la famille Atmel ATmega, tels que ATmega8, ATmega168 et ATmega328P. Les schémas électroniques sont librement accessibles, permettant aux concepteurs de développer leurs propres versions ou d'améliorer les modèles existants.

II.9 Carte CNC Shield :

La carte CNC Shield V3 est une carte d'extension destinée aux cartes Arduino UNO ou Arduino Mega. Elle permet l'interface simple avec des drivers de moteurs pas à pas tels que le A4988. [5]

Elle assure également la commande et la gestion des différents éléments nécessaires au fonctionnement d'une machine-outil à commande numérique (CNC), tels que :

- les fins de course (limit switches) .
- les ventilateurs de refroidissement .
- les broches de commande auxiliaires .
- d'autres périphériques nécessaires au système.

Cette interface est particulièrement facile à exploiter grâce à sa compatibilité avec le firmware GRBL, installé sur la carte Arduino UNO, ce qui permet de piloter efficacement une machine CNC à faible coût.

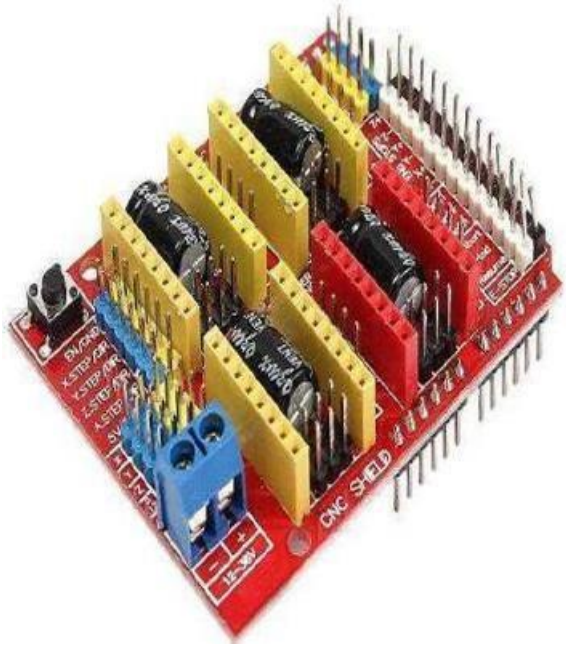


Figure 27 Carte CNC Shield V3. [6]

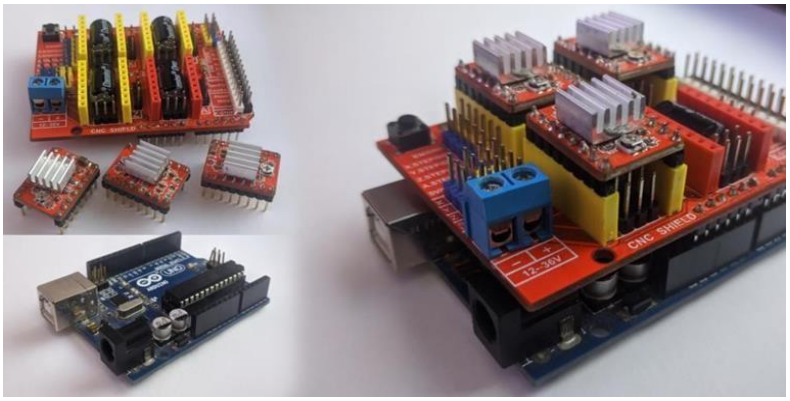


Figure 28 Assemblage du driver A4988 et de la carte CNC Shield avec la carte Arduino.

II.10 Interrupteur de fin de course :

En électrotechnique, l'interrupteur de fin de course, appelé également limit switch, est un dispositif commandé par le déplacement d'une partie mécanique de la machine ou par la présence d'un objet.

Il est utilisé pour le contrôle des machines dans le cadre de la sécurité, de l'interverrouillage ou encore pour le comptage d'objets passant en un point déterminé.

Le contacteur de fin de course comporte un actionneur mécaniquement relié à un ensemble de contacts électriques. Lorsqu'un objet entre en contact avec cet actionneur, le dispositif provoque l'établissement ou la coupure d'un circuit électrique.

Dans notre projet, ces interrupteurs seront utilisés pour définir les limites de déplacement des axes de la machine. Cette fonction est communément appelée fin de course ou capteur de limite.



Figure 29 Interrupteur de fin de course.

II.11 Alimentation

L'alimentation constitue une partie essentielle de la machine CNC. Son rôle principal est d'assurer la fourniture de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'ensemble du système. [5]

La carte Arduino UNO peut être alimentée soit par une connexion USB, soit par une source d'alimentation externe. La sélection de la source d'alimentation s'effectue automatiquement, grâce au circuit de commutation indiqué sur la figure suivante.



Figure 30 Boîtier d’alimentation. [6]

La tension d’alimentation recommandée pour la carte Arduino UNO se situe entre 7 V et 12 V. Les broches d’alimentation sont les suivantes :

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de conception que nous avons réparties en deux parties : la partie mécanique et la partie électrique.

Nous avons également décrit le principe de commande des trois axes à l’aide d’une carte de contrôle basée sur Arduino UNO ainsi que des drivers de puissance A4988, tout en réalisant une étude sur le choix des moteurs et des circuits de commande adaptés à notre application.

Par la suite, nous proposons de valider les résultats obtenus par la réalisation d’un prototype expérimental, et dans le chapitre suivant, nous présenterons la fabrication de ce prototype conformément aux étapes de conception précédemment décrites, ainsi que les différentes phases de programmation.

Chapitre III

Montage et Commande d'une Machine CNC

III. Conception d'une machine CNC

III.1 Introduction

Les machines à commande numérique par ordinateur (CNC) comptent parmi les technologies les plus importantes utilisées dans le domaine de la fabrication moderne. Elles permettent de réaliser des opérations d'usinage avec une grande précision et une vitesse élevée tout en réduisant considérablement les erreurs humaines. Les performances de ces machines reposent sur l'intégration harmonieuse des systèmes mécaniques, électroniques et informatiques afin d'assurer un contrôle précis du déplacement de l'outil suivant les différents axes.

Ce chapitre Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude détaillée de la machine à commande numérique par ordinateur (CNC) réalisée, à travers la présentation des différents composants qui la constituent, ainsi que des critères retenus pour leur choix et leur conception. Il aborde également les solutions techniques adoptées afin de satisfaire aux spécifications requises, tout en mettant en évidence le rôle de chaque composant dans la garantie du bon fonctionnement et de l'efficacité de la machine lors de son exploitation.

Structure mécanique

Afin de réaliser un système mécanique permettant le déplacement d'un corps dans l'espace, nous avons choisi l'aluminium pour la structure des axes et du châssis, en raison de sa légèreté par rapport à l'acier.

Les axes de guidage, les éléments coulissants ainsi que les dispositifs de fixation des pièces ont été réalisés en acier afin d'assurer une meilleure résistance mécanique et une plus grande rigidité du système.



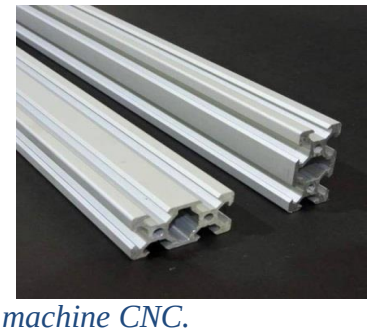


Figure 31 Représentation des composants utilisés dans la machine CNC.

-Après l'assemblage des éléments en aluminium, nous avons obtenu la structure mécanique représentée dans la figure 32 :

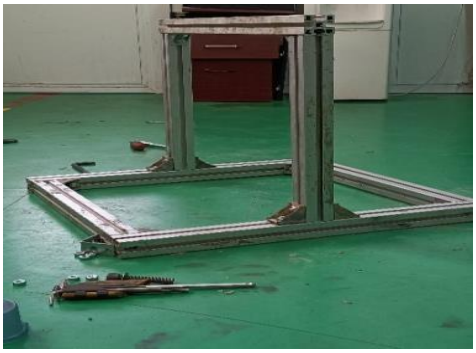


Figure 32 Structure mécanique de la machine .

-Le système est constitué de quatre parties principales : la base, l'axe X, l'axe Y et l'axe Z.

III.1.1 Axe Y

Il représente la base de notre machine. Il est constitué d'une plaque en aluminium et de deux rails de guidage actionnés par un système vis-écrou.

Cet axe doit être suffisamment rigide afin d'assurer la stabilité mécanique de la machine. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser des équerres de fixation et de renforcement permettant de maintenir les angles droits et d'assurer ainsi une excellente rigidité structurelle.

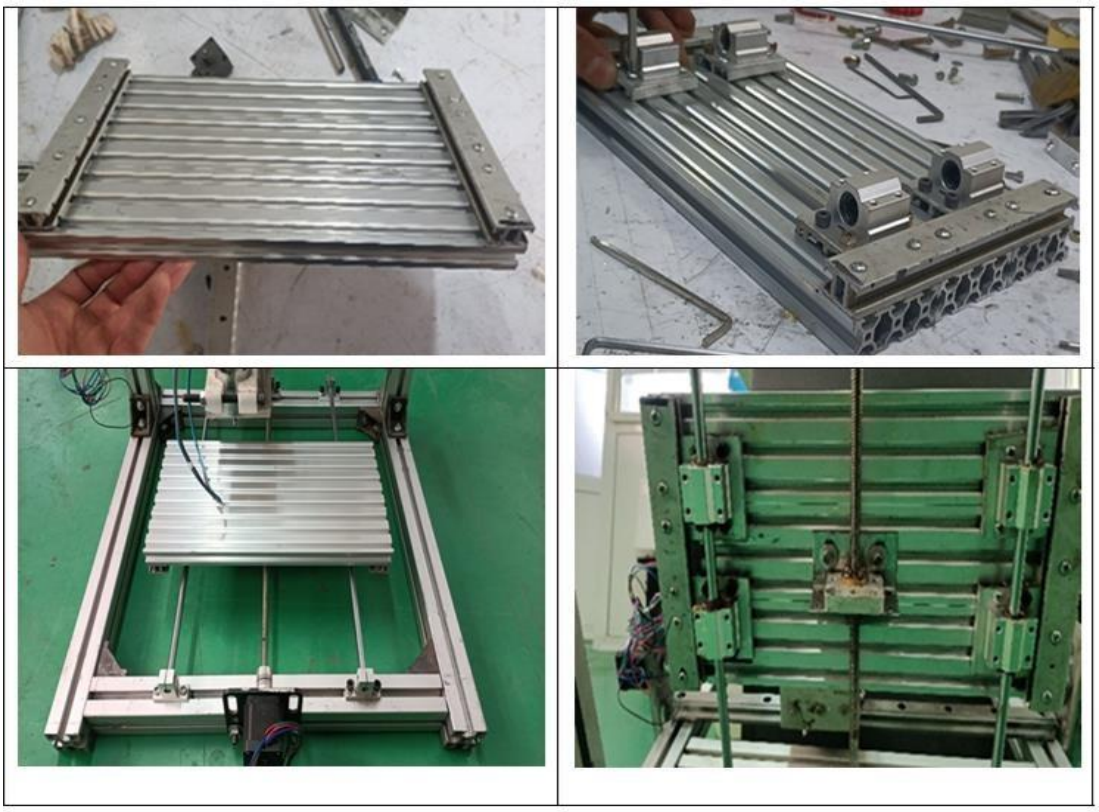


Figure 33 Structure mécanique de la machine .

III.1.2 Axe X

L'axe X est constitué d'un portique monté au-dessus de la base, comportant un rail de guidage permettant un déplacement horizontal suivant l'axe Y.

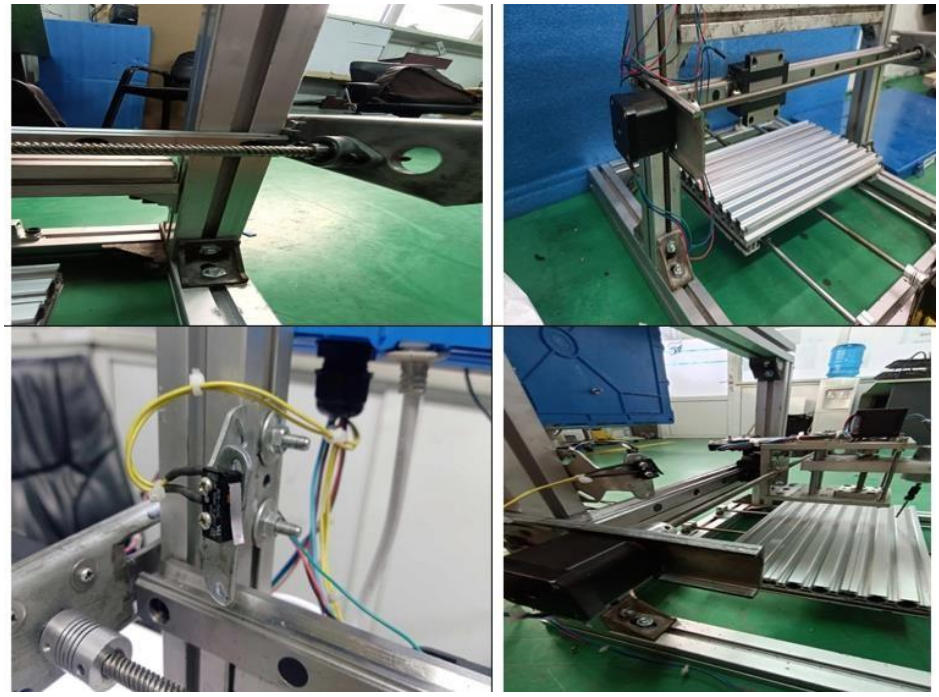


Figure 34 Axe X de la machine

III.1.3 Axe Z

Comme illustré dans la figure III.5, cet axe correspond à l'axe de la broche de la machine et doit être perpendiculaire à la table de travail.

Il est constitué de deux surfaces rectangulaires destinées à la fixation des extrémités des rails de guidage ainsi que de la vis à billes, entraînée par une vis trapézoïdale, en plus d'un support destiné au moteur de la broche.

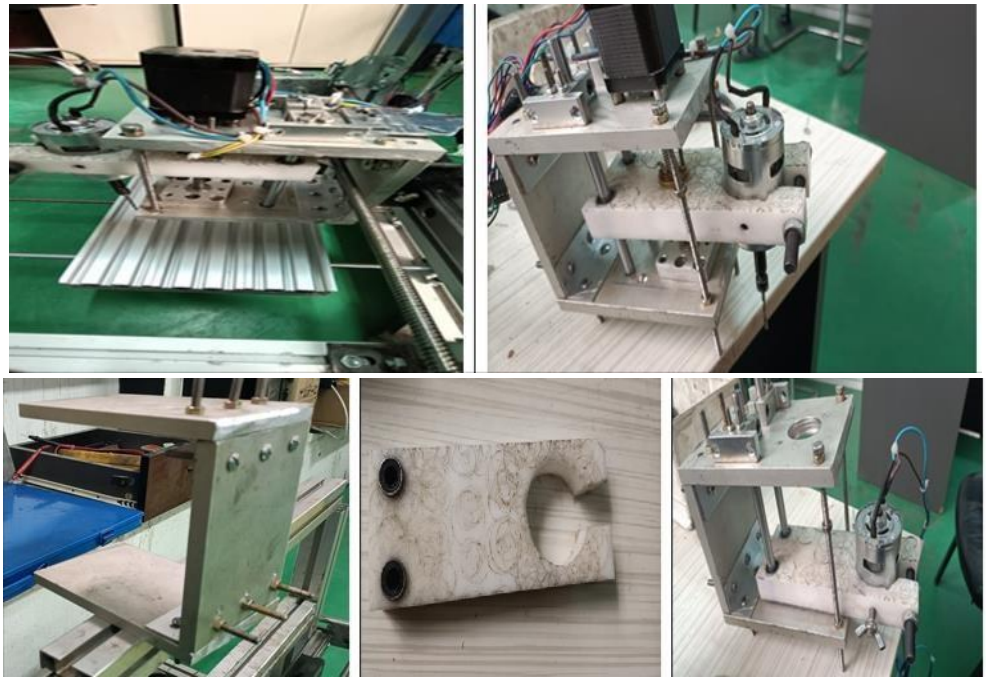


Figure 35 Axe Z de la machine.

III.2 Assemblage complet de la machine CNC :

Après avoir présenté les différents éléments de la machine CNC, nous procédons à leur assemblage afin d'obtenir une machine CNC complète, comme illustré dans la figure ci-dessous.



Figure 36 Figure finale de la machine .

III.3 Câblage électrique

Afin d'obtenir la configuration finale de la machine, il est nécessaire de réaliser le câblage des différents composants électriques ainsi que les opérations d'assemblage nécessaires.

L'assemblage et les connexions des différents éléments de puissance et de commande sont présentés dans la section suivante.

III.3.1 Assemblage de l'Arduino Uno et du CNC Shield

1. Les broches STEP des axes X, Y et Z de la carte CNC Shield sont reliées respectivement aux broches numériques 2, 3 et 4 de la carte Arduino UNO. Leur rôle est de générer les impulsions de commande des moteurs pas à pas.
2. Les broches DIR des axes X, Y et Z de la carte CNC Shield sont connectées respectivement aux broches numériques 5, 6 et 7. Elles permettent de contrôler le sens de rotation des moteurs pas à pas.
3. La broche numérique 8 de l'Arduino UNO est reliée à l'entrée d'activation des drivers, assurant ainsi l'activation des moteurs pas à pas.
4. Les broches END STOPS des axes X, Y et Z de la carte CNC Shield sont reliées respectivement aux broches numériques 9, 10 et 11. Elles servent à recevoir les signaux provenant des interrupteurs de fin de course des trois axes.
5. La broche SpnEn de la carte CNC Shield est connectée à la broche numérique 12 et permet l'activation du moteur de la broche.
6. La broche SpnDir de la carte CNC Shield est connectée à la broche numérique 13 et assure le contrôle du sens de rotation du moteur de la broche.

Remarque : dans cette version du firmware GRBL, les broches 11 et 12 de l'Arduino UNO ont été permutées afin d'utiliser la fonction PWM disponible sur la broche 11 pour le contrôle du moteur de la broche.

Finalement, nous obtenons l'assemblage électrique illustré dans la figure suivante.

III.3.2 Câblage électrique global

Le schéma électrique présente le raccordement des différents composants de la machine CNC. L'alimentation convertit la tension du réseau 220 V en 12 V DC pour alimenter la carte de commande Arduino CNC Shield ainsi que les différents éléments du système. Les moteurs pas à pas des axes X, Y et Z assurent les déplacements de la machine, tandis que les interrupteurs de fin de course permettent de limiter les mouvements et de protéger le système. Le montage comprend également un interrupteur principal, un voyant lumineux indiquant la présence de l'alimentation, un ventilateur de refroidissement et un moteur de broche chargé d'entraîner l'outil de coupe. Ce câblage garantit le fonctionnement correct et sécurisé de la machine.

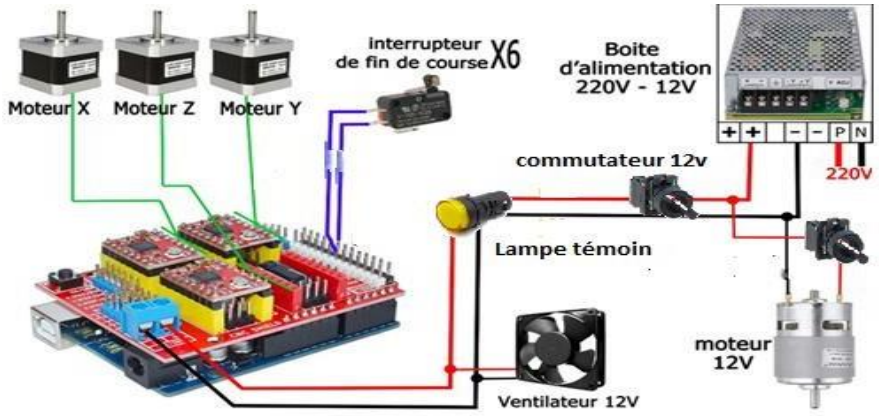


Figure 37 Le schéma électrique global illustre l'ensemble du câblage du système.

III.4 Chaîne de programmation

Ce schéma représente le principe de commande de la machine CNC, qui peut être exploitée selon deux modes de fonctionnement :

Mode automatique : la pièce est d'abord conçue à l'aide d'un logiciel de CAO/FAO, puis enregistrée sous un format tel que STL, SVG ou DXF. Un fichier G-code contenant les instructions d'usinage est ensuite généré. Ce fichier est interprété par le logiciel UGS, qui transmet les commandes à la carte Arduino.

Mode manuel : l'utilisateur peut contrôler directement les déplacements de la machine à l'aide du Jog Controller ou de la Console, sans avoir recours à un fichier G-code.

La carte Arduino reçoit les commandes et les convertit en signaux de contrôle destinés au pilote A4988. Ce dernier fournit les impulsions nécessaires aux moteurs pas à pas, assurant ainsi le déplacement des différents axes de la machine.

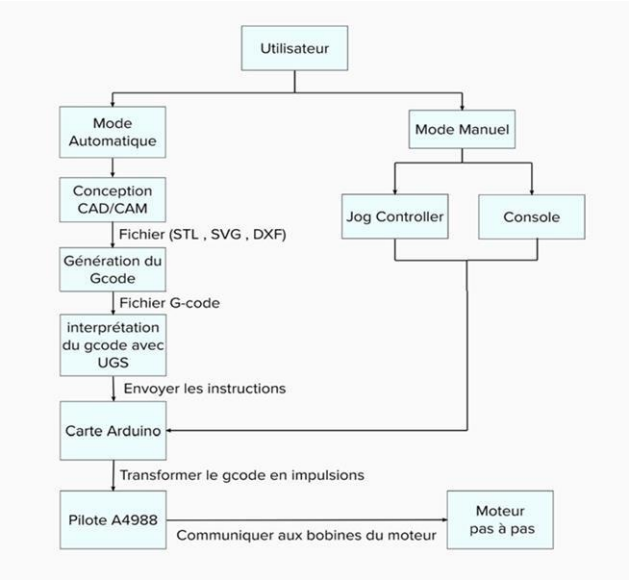


Figure 38 Chaîne de programmation .

III.5 Description des logiciels utilisés

Après avoir présenté les différentes étapes de fabrication de la machine CNC, il est maintenant nécessaire d'aborder les procédures de programmation et de mise en fonctionnement de cette machine étape par étape.

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons la chaîne de programmation, les logiciels utilisés, leur installation, leurs rôles, leurs fonctionnalités ainsi que les différentes instructions nécessaires au fonctionnement du système.

III.5.1 G-Code:

Le G-Code est une suite d'instructions utilisée pour indiquer à une machine CNC quand et comment se déplacer suivant ses différents axes. Il s'agit du langage de programmation standard utilisé pour le contrôle des machines à commande numérique par ordinateur.

Le G-Code est constitué d'un ensemble de lignes de commande pouvant être regroupées dans un fichier afin de créer un programme complet. Ce programme permet de définir les différents mouvements exécutés par la machine, tels que les déplacements linéaires, les interpolations circulaires et autres trajectoires d'usinage.

Le G-Code est largement utilisé dans les machines de fabrication assistée par ordinateur, notamment :

- les fraiseuses CNC .
- les tours CNC .
- les imprimantes 3D .
- les machines de découpe laser.

Le tableau 1 suivant résume les principales fonctions du G-Code :

G00	Déplacement rapide
G01	Interpolation linéaire
G02	Interpolation circulaire (sens horaire)
G03	Interpolation circulaire (sens antihoraire)
G04	Arrêt programme et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation - suivi del'argument F ou X en secondes)
G10/ G11	Écriture de données/Effacement de données
G17	Sélection du plan X-Y
G18	Sélection du plan X-Z
G19	Sélection du plan Y-Z
G20	Programmation en pouces
G21	Programmation en mm
G28	Retour à la position d'origine
G31	Saute la fonction (utilisé pour les capteurs et les mesures de longueur d'outil)
G33	Filetage à pas constant
G34	Filetage à pas variable
G90	Déplacements en coordonnées absolues
G91	Déplacements en coordonnées relatives
G94/ G95	Déplacement en Pouces par minute/Pouce par tour
M00/ M01	Arrêt du programme, arrêt optionnel ou avec condition
M30	Fin du programme, réinitialisation

Tableau III-1 : Fonctions principales du G-Code .

III.5.2 Logiciel Arduino IDE

Pour la programmation de la carte Arduino UNO, le logiciel Arduino IDE a été utilisé. Il s'agit d'un logiciel gratuit, disponible en téléchargement sur le site officiel d'Arduino. Il est compatible avec les systèmes d'exploitation Windows, Mac OS et Linux.

Ce logiciel se distingue par une interface utilisateur simple, permettant de développer facilement des programmes transférables vers la carte via une connexion USB.

Le langage utilisé dans l'environnement Arduino est basé sur le langage C/C++, auquel sont ajoutées des instructions spécifiques propres à l'écosystème Arduino. Le logiciel propose également une riche bibliothèque d'exemples facilitant l'apprentissage et la réutilisation de blocs de code préexistants.

Présentation du logiciel :

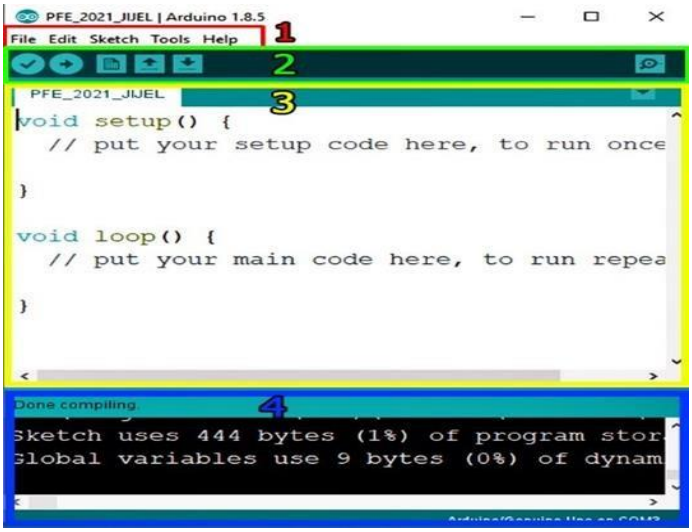


Figure 39 Il représente la fenêtre principale du logiciel ' Arduino IDE' .

Partie 1 : représente les options de configuration du logiciel.
Partie 2 : représente la barre d'outils.
Partie 3 : représente l'éditeur de texte permettant l'écriture du programme.
Partie 4 : représente la fenêtre de messages affichant les résultats de compilation du programme.

- ✓ Présentation des boutons de la partie 2 (Figure 40).



Figure 40 Présentation des boutons.

• Bouton 1 : permet de vérifier le programme et de détecter les erreurs de compilation.
• Bouton 2 : permet de téléverser le programme vers la carte Arduino UNO.
• Bouton 3 : permet de créer un nouveau fichier.
• Bouton 4 : permet d'ouvrir un fichier existant.
• Bouton 5 : permet d'enregistrer le fichier.
• Bouton 6 : permet d'ouvrir le moniteur série (Serial Monitor).

III.5.3 GRBL

Le firmware GRBL est un programme open source compact et performant, conçu pour le contrôle des mouvements de machines à l'aide d'une carte Arduino UNO. Il a été adapté à de nombreux projets tels que les machines CNC et les imprimantes 3D.

GRBL joue le rôle d'interface entre les instructions écrites en G-Code et la commande des moteurs pas à pas exécutant ces instructions.

En pratique, GRBL constitue le centre de contrôle chargé de gérer avec précision le mouvement des moteurs pas à pas de la machine, en générant continuellement des impulsions électriques à haute fréquence. Ces impulsions permettent de déplacer l'outil de manière progressive et précise selon les trajectoires programmées.

III.5.4 Installation de GRBL sur la carte Arduino

- La première étape, après le téléchargement de GRBL, consiste à copier le dossier décompressé dans le répertoire des bibliothèques de l'environnement Arduino IDE :

C:\Program Files (x86)\Arduino\libraries\

- L'étape suivante consiste à ouvrir le logiciel Arduino IDE, puis accéder au menu :

File > grbl > grblUpload

et ouvrir ce fichier.

- Une fois le fichier ouvert, il suffit de le téléverser vers la carte Arduino UNO en cliquant sur le bouton de téléversement.

III.5.5 Universal G-Code Sende

Le logiciel Universal G-Code Sender est une application développée en Java permettant d'envoyer des fichiers G-Code vers le firmware GRBL d'une machine CNC.

À l'aide du logiciel Universal G-Code Sender, il est possible de contrôler le système grâce aux commandes G-Code, telles que le déplacement des moteurs pas à pas vers les positions d'origine.

Pour le contrôle de la machine CNC, ce logiciel offre deux modes principaux d'utilisation : le mode manuel et le mode automatique.

L'interface principale du programme comporte des boutons dédiés au contrôle individuel de chaque moteur. Après avoir sélectionné le mode approprié, l'utilisateur peut accéder aux commandes correspondantes à chaque mode de fonctionnement.

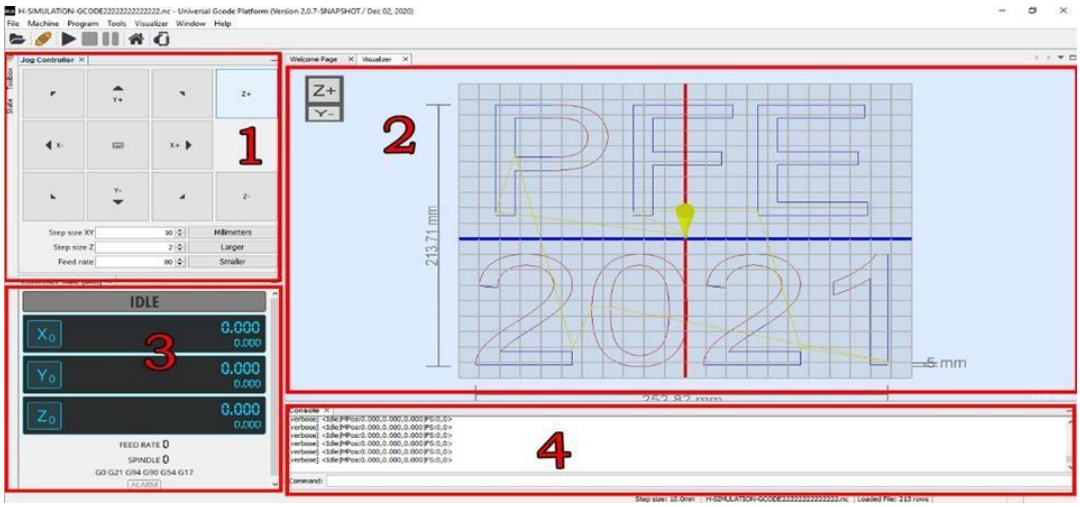


Figure 41 Présentation des boutons.

- **Partie 1 :** représente le mode manuel à l'aide des boutons de commande.
- **Partie 2 :** représente le visualiseur (Visualizer).
- **Partie 3 :** représente l'état du contrôleur. Il existe plusieurs états :
  - **État IDLE :** lorsque la machine est inactive ;
  - **État JOG :** lorsque la machine fonctionne en mode manuel ;
  - **État RUN :** lorsque la machine fonctionne en mode automatique ;
  - **État ALARM :** lorsque le contrôleur est verrouillé ;
  - **État OFF-LINE :** lorsque la machine n'est pas connectée ;
  - **État UNKNOWN :** lorsque l'état est inconnu.
- **Partie 4 :** représente le mode manuel par saisie directe des commandes G-Code.

Le mode automatique s'effectue par l'ajout d'un fichier G-Code qui sera affiché dans le visualiseur en attente de son envoi vers la machine.

III.5.6 Inkscape

Le logiciel Inkscape est un programme open source utilisé pour le dessin et la conception en deux dimensions à l'aide de graphiques vectoriels (Vector Graphics). Ce logiciel est largement utilisé dans les applications des machines CNC pour la création et la préparation des dessins avant leur conversion en commandes d'usinage.

Dans une machine CNC, le logiciel Inkscape est utilisé pour concevoir les formes et les dessins à usiner ou à graver. Il permet également d'importer et de modifier facilement des fichiers sous différents formats tels que SVG et DXF.

Après l’achèvement du dessin, celui-ci est converti en trajectoires (Paths) afin d’être exploitable par les logiciels de fabrication assistée par ordinateur (FAO/CAM), tels que JSCut, qui génèrent ensuite le fichier G-Code destiné à la machine CNC.

Parmi les principaux avantages du logiciel Inkscape dans les applications CNC, on peut citer :

- la facilité d’utilisation .
- la prise en charge des graphiques vectoriels de haute précision .
- la possibilité de modifier les dimensions et les formes avec précision .
- le support de plusieurs formats de fichiers .
- la compatibilité avec les logiciels de génération de G-Code.

Ainsi, Inkscape représente une étape essentielle dans la chaîne de fonctionnement d’une machine CNC, puisqu’il permet de réaliser le dessin initial avant sa transformation en instructions exécutables par la machine.

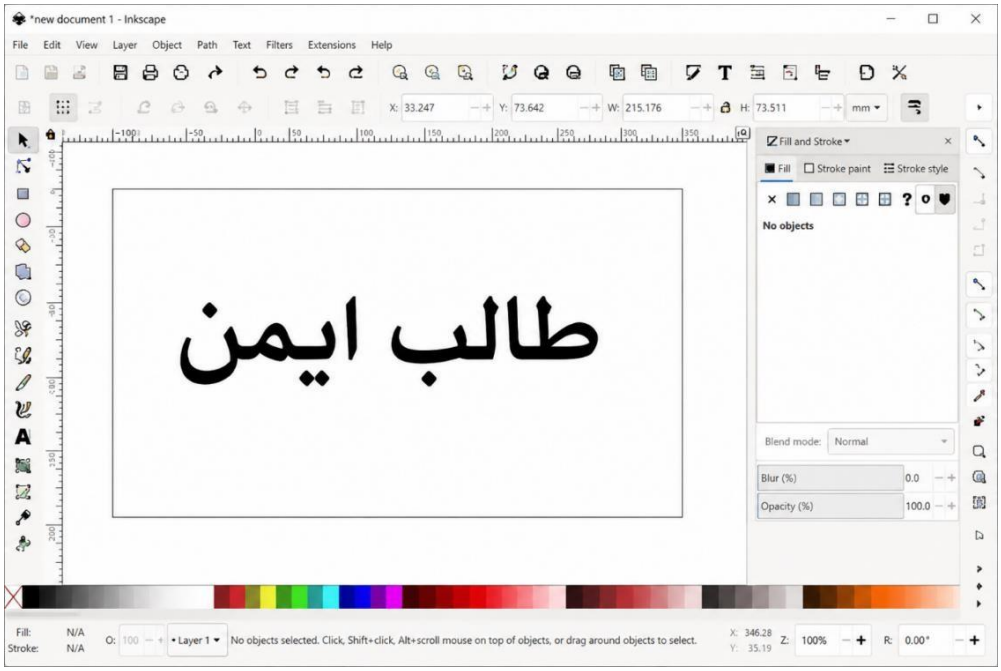


Figure 42 Interface du logiciel Inkscape .

III.5.7 JSCut

Le logiciel JSCut est une application web open source utilisée pour convertir des dessins 2D en commandes G-code lisibles par une machine CNC.

JSCut est un logiciel de type CAM (Computer Aided Manufacturing) qui fonctionne directement dans un navigateur web, sans installation.

Son rôle principal est de transformer des fichiers SVG réalisés avec des logiciels de dessin comme Inkscape en fichiers G-code destinés aux machines CNC.

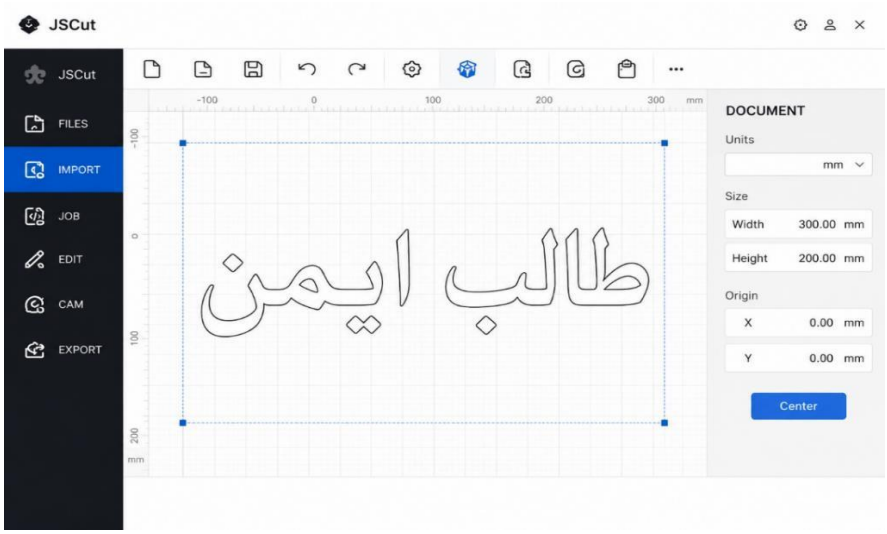


Figure 43 Interface du logiciel JSCut .

III.6 Fonctionnement et application:

Comme exemple de fabrication, le mot « طالب ايمن » a été choisi, car il constitue une expérience appropriée pour le premier essai de la nouvelle machine CNC.

III.6.1 Création du texte dans Inkscape :

- Ouvrir le logiciel Inkscape.
- Sélectionner l'outil Texte.
- Écrire le mot : **Taleb Aymen**.
- Choisir la police et la taille souhaitées.
- Ajuster la position du texte dans la zone de travail.



Figure 44 Écriture du mot «□□□□ □□□□ » dans le logiciel Inkscape

.

III.6.2 Conversion du texte en tracé

- Sélectionner le texte.
- Cliquer sur :
  Chemin → Objet en chemin
  afin de transformer les lettres en formes vectorielles exploitables par la machine CNC.



Figure 45 Transformation du texte en Path.

III.6.3 Enregistrement du fichier :

Enregistrer le dessin au format **SVG** :
Fichier → Enregistrer sous → SVG

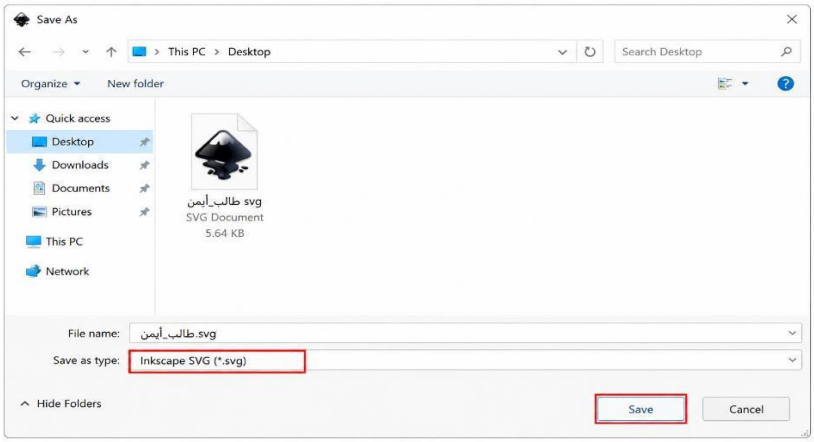


Figure 46 Enregistrement du fichier au format SVG.

III.6.4 Importation dans JSCut

- Ouvrir JSCut dans le navigateur web.
- Importer le fichier SVG créé avec Inkscape.

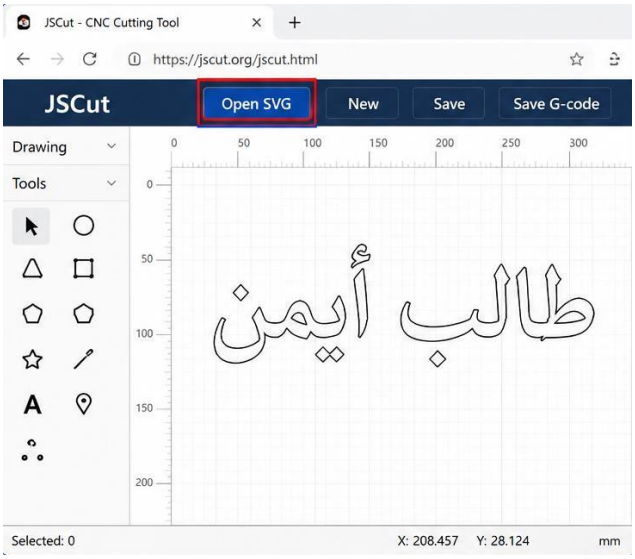


Figure 47 Enregistrement du fichier au format SVG.

III.6.5 Réglage des paramètres d'usinage :

Définir les paramètres nécessaires :

- diamètre de l'outil .
- profondeur de coupe .
- vitesse d'avance .
- vitesse de plongée .
- nombre de passes.

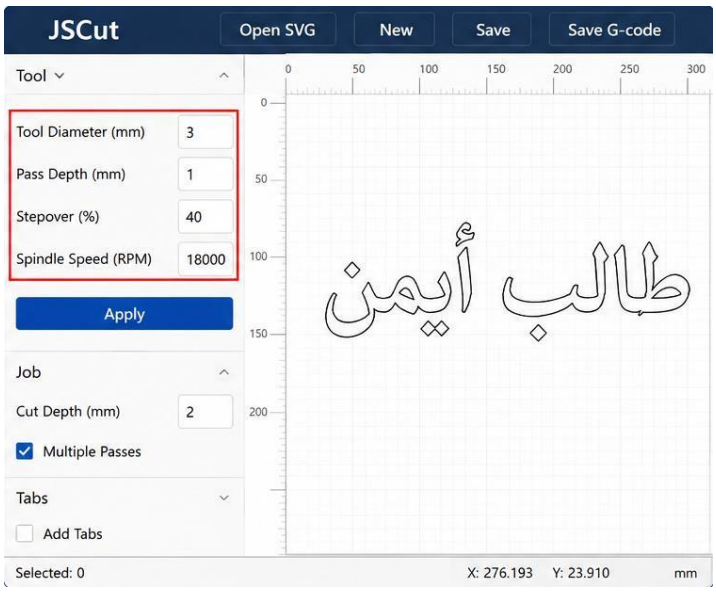


Figure 48 Enregistrement du fichier au format SVG.

III.6.6 Choix du type d'opération (Operation) :

Choisir le type d'opération approprié :

- **Outside Cut (découpe extérieure)** : pour découper la forme extérieure du dessin.
- **Inside Cut (découpe intérieure)** : pour découper les parties internes.
- **Pocket (vidage)** : pour enlever une zone entière à l'intérieur.
- **Engrave (gravure)** : pour graver des lignes ou du texte.

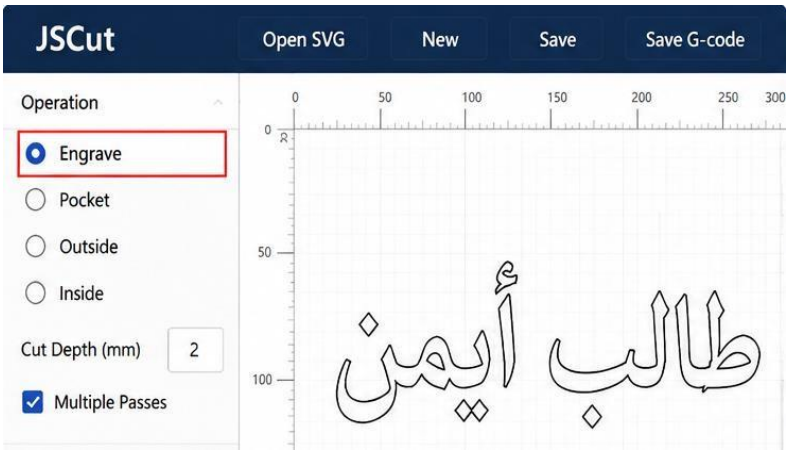


Figure 49 Choix d.u type d'opération (Operation).

III.6.7 Génération du G-code :

- Cliquer sur l'option de génération du G-code.
- Le logiciel convertit automatiquement le dessin en commandes CNC.

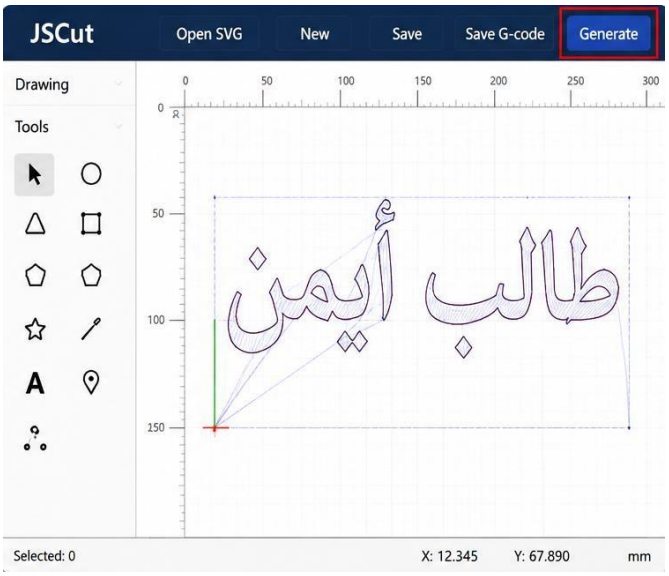


Figure 50 Génération du G-code

.

III.6.8 Enregistrement du fichier G-code

Sauvegarder le fichier généré avec l'extension .gcode.

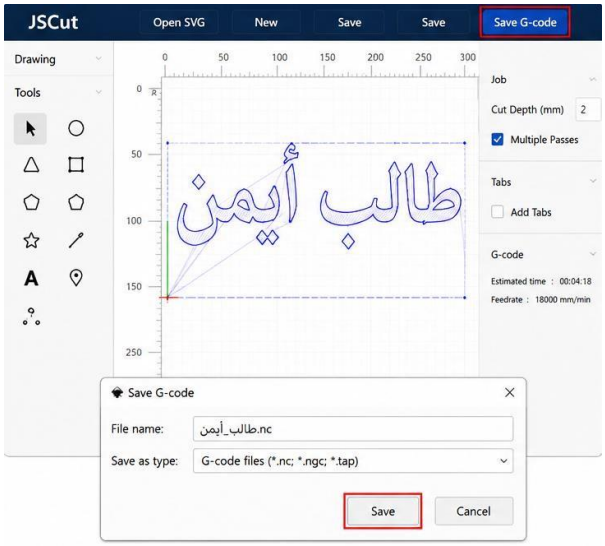


Figure 51 Enregistrement du fichier G-code .

III.6.9 Exécution sur la machine CNC

Étapes principales :

1. Ouvrez un logiciel de contrôle de la machine CNC comme :Candle .

Universal Gcode Sender (UGS).

2. Connectez la machine CNC à l'ordinateur.

3. Effectuez le retour à l'origine de la machine : Home.

4. Définissez le point de départ :

X = 0

Y = 0

Z = 0

5. Ouvrez le fichier G-code.

6. Cliquez sur : Start .

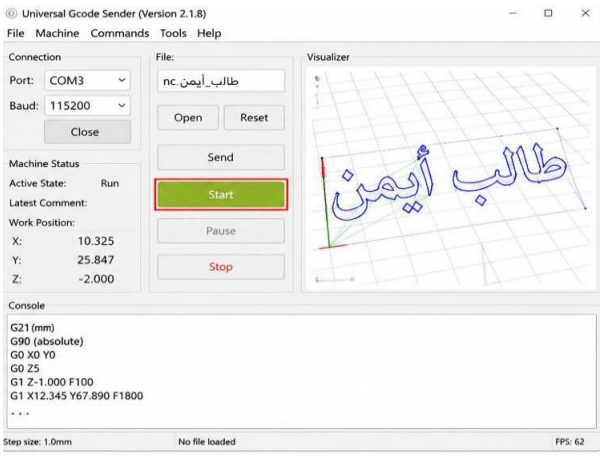


Figure 52 Exécution du fichier sur la machine CNC .

Enfin, après la mise sous tension et le démarrage de l'opération, la machine CNC commence automatiquement à dessiner le mot « Taleb Aymen ».

III.7 Tableau des coûts du projet :

عدد القطع	اسم القطعة	تكلفة	الخسائر
4	ROULEMENT LINÉAIRE GLISSIÈRE	3800دج	0
5	Linear Ball Bearings 8mm	1000دج	1500دج
3	Stepper Motor Trapezoidal Lead Screw 8MM	6000دج	0
4	8mm Linear shaft round rod L800mm	4000دج	0
1	KFL001 8mm Dia Bore Aluminum Alloy Self	750دج	0
12	Aluminum Profile Corner Bracket	3000دج	0
3	NEMA 17 jk 42hs34 1334AC 1.8A	9000دج	0
3	Aluminum Couplers for stepper motor 5*8mm	2700دج	0
1	Aluminium V-SLOT	2950دج	0

		2060 1M	
0	10800دج	Aluminium V-SLOT 3030	4
0	3040دج	SK8 8mm Linear Bearing Rail Shaft Support Linear Rail Vertical Bearings Shaft Guide Support Bracket	8
0	1000دج	CNC SHIELD V3 FOR ARDUINO NANO	1
0	2500دج	ARDUINO UNO R3 ATMEGA328P	1
0	1800دج	A4988 DRIVER CONTROLLER +STEPPER MOTOR DRIVER	3
0	3000 دج	boite alimentation 12V	1
0	3500دج	DC MOTOR RS-540 (12V9600 RPM)	1
0	1500دج	SWITCH	3
0	4000دج	MECH AVEC MONDRA	1

مجموع التكاليف	62340 دج

Tableau III-2:Tableau des coûts du projet.

III.8 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté le processus de fabrication de la machine ainsi que les procédures de son fonctionnement.

Nous avons tout d'abord expliqué en détail les étapes de fabrication et d'assemblage mécanique. Ensuite, nous avons présenté la méthode de connexion de la partie électrique et électronique.

Par la suite, une description détaillée des procédures de programmation et des logiciels utilisés a été donnée.

Enfin, les procédures de fonctionnement ont été présentées à l'aide des logiciels Inkscape et Universal Gcode Sender (UGS).

Au final, nous avons réussi à assembler les différents éléments de la machine et à réaliser le contrôle numérique. Les résultats des essais de fabrication obtenus ont été satisfaisants.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié, conçu et réalisé un prototype de machine à commande numérique par ordinateur (CNC) à trois axes, basé sur une carte Arduino UNO et des drivers A4988 pour la commande des moteurs pas à pas. Ce travail nous a offert l'opportunité d'appliquer les connaissances théoriques acquises au cours de notre formation et de les concrétiser à travers un projet pratique combinant les aspects mécaniques, électroniques et informatiques.

Au cours de la réalisation du projet, nous avons étudié le principe de fonctionnement des machines CNC ainsi que leurs différents composants. Nous avons ensuite conçu la structure mécanique de la machine, sélectionné les composants électroniques appropriés et mis en œuvre le système de commande à l'aide du logiciel GRBL et des instructions G-Code. L'assemblage et les essais expérimentaux ont également été effectués afin de vérifier le bon fonctionnement du système et la précision des déplacements selon les trois axes (X, Y et Z).

Nous avons rencontré plusieurs difficultés lors des phases de conception et de réalisation, notamment sur les plans mécanique, électronique et logiciel. Cependant, grâce aux connaissances acquises durant notre cursus universitaire ainsi qu'aux précieux conseils de nos encadreurs, nous avons pu surmonter ces obstacles. Cette expérience a contribué au développement de nos capacités d'analyse, de résolution de problèmes techniques et de travail sur un projet multidisciplinaire.

Ce projet nous a permis d'acquérir une expérience pratique précieuse dans les domaines de la conception mécanique, de la programmation des systèmes de commande et du pilotage des moteurs pas à pas, ainsi que dans l'intégration des différents composants du système afin d'atteindre les performances souhaitées. Il a également renforcé nos compétences en recherche, en développement et en innovation, tout en mettant en évidence l'importance de l'automatisation industrielle dans l'amélioration de la productivité, de la précision et de la qualité.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail pourra constituer une référence utile pour les futurs étudiants et contribuer à encourager la recherche et le développement dans le domaine des machines CNC et de l'automatisation industrielle. Des perspectives d'amélioration demeurent envisageables, notamment par l'ajout de nouvelles fonctionnalités et l'optimisation des performances de la machine afin de répondre à des applications industrielles plus avancées.

Références
Bibliography

Références Bibliography

Bibliography

[1] Djamel SMAINI et Rafik BEN KADI , «Conception et réalisation d’une machine cnc,» TIZI-OUZOU, 2015.

[2] BOUYAHIA YESSINE, «Réalisation d'un prototype d'une machine CNC 3 axes,» Tlemcen, 2019.

[3] C. Layosa, «Guides glissants, Partie 2 : Silents linéaires vs. guides linéaires,» usa, 2014.

[4] Mohammed Raïd ABDEMEZIANE et Djamal BENABIED , «Conception et réalisation d’une machine CNC,» Mila, 2020.

[5] LEHZIEL MOHAMMED et MOHAMMED DAOUDI, «onception et réalisation d’une machineCNC,» OUARGLA , 2022.

[6] G. Jack Lipovski, Introduction aux microcontrôleurs, 2 éd., usa, 2004.