



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Contribution au Développement d'une mini Fraiseuse CNC 5axes

Memoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplome de Master 02
Fabrication Mécanique et Productique

Preprésentée par :

- DAHAS Hocine
- BOUKHALFA BENNAI Abdelmalek

Promoteur : Professeur CHETTIBI Taha

2023 / 2024



Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon directeur de recherche, monsieur « **Taha CHETTIBI** », pour son soutien constant, ses conseils avisés et ses encouragements tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son expertise ont été inestimables.*

*Je souhaite également remercier l'ensemble des professeurs et des membres du département de mécanique de l'**université Saad Dahlab Blida** pour leur enseignement et leur aide précieuse durant ces années d'études.*

Un grand merci à mes collègues et amis pour leur soutien moral et leurs encouragements, qui ont toujours été là pour m'encourager et partager leurs idées.

*Je suis profondément reconnaissant envers **ma famille**, et en particulier mes parents, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel. Leur foi en moi a été une source inépuisable de motivation.*

Enfin, je souhaite remercier toutes les personnes et les institutions qui ont fourni des ressources, des informations et des opportunités de recherche pour ce projet. Leur contribution a été essentielle à l'avancement de mes travaux.

Merci à tous.

TABLEAU DES MATIERES

Remerciement	2
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
Liste des abreviation	9
Résumé	10
Introduction générale	11
Historique	13
Chapitre 1 : GENERALITES SUR L'USINAGE 5-AXES	15
Introduction	15
I. C'est quoi l'usinage 5-axe	15
II. Classification des machines cnc 5-axes	19
III. Comment fonctionne une machine cnc a 5-axes ?	20
IV. Avantages de l'Usinage CNC a 5-axe	21
V. Inconvénients de l'usinage cnc 5axes	23
VI. Domaine d'utilisation	24
Conclusion	25
Chapitre 2 : Analyse fonctionnel de la MOCN 5-axes	27
Introduction	27
I. Mise en situation	27
II. Analyse fonctionnelle externe	29
A . Expression du besoin	29
B. Identification des fonction de service	32
III. Analyse fonctionnelle Interne	33
IV. Elaboration du cahier des charges fonctionnel du produit	35
Conclusion	36

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie mécanique de la machine

Introduction	33
Structure du bati	35
Les actionneurs	38
Elément de guidage et montage des axes	39
Dispositif d'enlèvement de matière	45
Assemblage de la machine et réalisation	46
Conclusion	49

Chapitre 4: DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

INTRODUCTION.....	51
Calcul des forces axiales et des couples	54
Propriété de l'étude	68
Unités	69
Propriétés du matériau	70
Actions extérieures	71
Information sur le contact	72
Information sur le maillage	72
Informations sur le maillage – Détails.....	72
Forces résultantes.....	73
Force de réaction	73
Moments de réaction	73
Force de corps libre	73
Moment externes	73
Résultat de l'étude	74
Conclusion générale	76

ANNEXE	78
Référence	96

LISTE DES FIGURES

FIGURE	TITRE	PAGE
Figure 1	Les axes mobilisés pour un usinage conventionnel à 3 axes	9
Figure 2	Les axes mobilisés pour une usinage à 4 axes	10
Figure 3	Différentes configurations des axes mobiles sur une machine cnc 5	11
Figure 4	Chaîne numérique en 5 axes	14
Figure 5	Modèles de MOCN-5axes similaires à celle qu'on désire réaliser	24
Figure 6	chaîne cinématique de la MOCN 5axes ciblée	24
Figure 7	diagramme Bête à cornes du produit ciblé	25
Figure 8	Diagramme Pieuvre du produit ciblé	28
Figure 9	Diagramme FAST de notre produit	29
Figure 10	Diagramme SADT de la Machine	30
Figure 11	Exemples de modèles CAO de solutions étudiées pour répondre aux exigences du cahier de charges	35
Figure 12	Partie principale du bâti de la machine en aluminium de la machine CNC 5 axes	36
Figure 13	Assemblage par vis et écrous de la structure en aluminium	36
Figure 14	Structure de support en acier (tube carré) de la machine CNC 5 axes	37
Figure 15	Assemblage de la structure du bâti de la machine CNC 5	38
Figure 16	Moteur NEMA 23 avec son support	38
Figure 17	Système de transformation de mouvement des axes linéaires XYZ : Tige filetée trapézoïdale, écrou et supports d'axe linéaire	39
Figure 18	Guidage linéaire composé de rails et de patins utilisé pour l'un des axes de notre machine	40
Figure 19	Assemblage complet de l'axe X de la machine CNC 5 axes.	40
Figure 20	Système de guidage pour l'axe Y	41

Figure 21	Assemblage complet de l'axe Y de la machine CNC 5	42
Figure 22	Vue d'ensemble de l'axe Z	43
Figure 23	Système de Montage de l'axe Z sur l'axe X	43
Figure 24	Fixation de l'axe A et du 1 ^{er} moteur nema 17	43
Figure 25	Montage de la poulie GT2 et de la courroie pour la transmission du mouvement	44
Figure 26	Support en Forex pour la fixation du deuxième moteur NEMA 17 pour l'axe de rotation B.	44
Figure 27	Pièces imprimées en 3D pour la fixation de la mini meuleuse Crown	46
Figure28	Conception Finale retenue de la mini fraiseuse 5 axes CNC	46
Figure 29	Réalisation de l'axe Z et de l'axe A	47
Figure 30	réalisation des axes A et B et montage de la broche	47
Figure 31	Assemblage complet de la machine	48
Figure 32	vérification de l'Assemblage de la machine à l'aide du Laser Tracker	49
Figure 33	dessin d'une tige	54

Liste des tableaux

<u>Tableau</u>	<u>titre</u>	<u>page</u>
Tableau 1	Les cinq mouvements possibles sur une machine 5-axes	11
Tableau 2	Domaines d'application de l'usinage CNC à 5 axes	19
Tableau 3	Besoins effectifs pour le produit ciblé.	27
Tableau 4	Les Fonctions de service de notre produit	28
Tableau 5	Le CdCF de notre machine	31
Tableau 6	les masse de l'axe X	52
Tableau 7	les masse de l'axe Y	52
Tableau 8	les masse de l'axe Z	52
Tableau 9	les masse de l'axe A et B	53

LISTE DES ABREVIATION

Abréviation	Definition
CN	Command Numérique
MOCN	Machine-outil à commande numérique
DCN	Contrôle numérique direct
CNC	Commande Numérique par Calculateur
CAO	Conception assistée par ordinateur
CC	Courant continu
AC	Courant alternatif
NEMA	National electrical manufacturers association
FET	Transistor à effet de champ (Field-effect transistor)
DOC	Profondeur de Coupe (Depth of Cut)
WCS	Système de Coordonnées de Travail (Work Coordinate System)
TLO	Offset de Longueur d'Outil (Tool Length Offset)
CI	Circuit intégré
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
M-code	Code de commande auxiliaire pour les machines CNC
DRO	Visualisation Numérique (Digital Readout)
SADT	Structured Analysis and Design Technique
FAST	Function Analysis System Technique
BAC	Bête à Cornes
FP	Fonction Principale
FC	Fonction de Contrainte
FS	Fonction de Service

المخلص

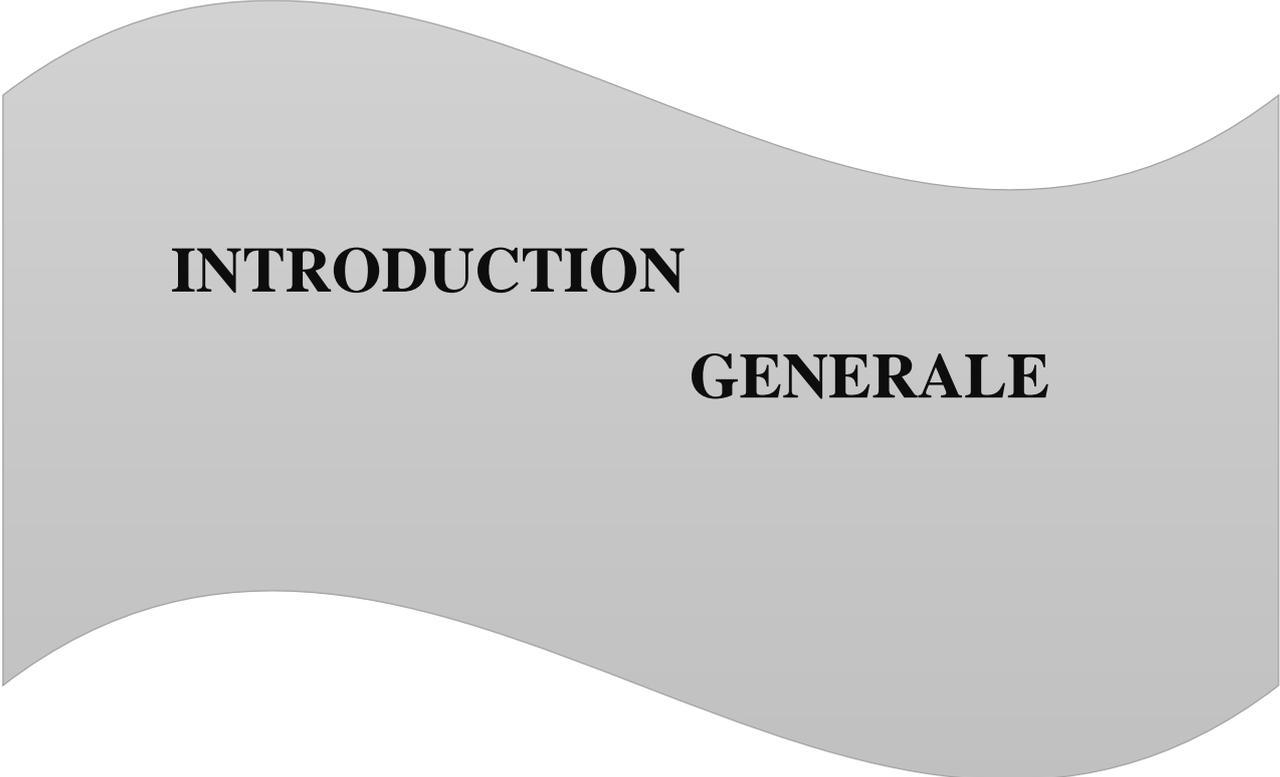
تقدم هذه الرسالة مساهمة في تطوير آلة تشغيل ذات تحكم رقمي بالحاسوب (CNC) بخمسة محاور. الهدف الرئيسي هو تحسين تصميم هيكل الآلة مع مراعاة القوى المحورية التي تتولد أثناء التشغيل. يتم استخدام منهجية تجمع بين النمذجة النظرية والمحاكاة الرقمية والتجريب لضمان متانة ودقة واستدامة الآلة. النتائج المتحصلة تتيح تحسينات كبيرة في تصميم آلات CNC بخمسة محاور، مما يوفر أداءً أفضل وموثوقية أكبر.

Abstract

This thesis presents a contribution to the development of a 5-axis computer numerical control (CNC) machine tool. The main objective is to optimize the structural design of the machine by considering the axial forces generated during machining. A methodology combining theoretical modeling, numerical simulation, and experimentation is used to ensure the robustness, precision, and durability of the machine. The results obtained allow for significant improvements in the design of 5-axis CNC machines, thus offering better performance and greater reliability.

Résumé

Ce mémoire présente une contribution au développement d'une machine-outil à commande numérique (CNC) à 5 axes. L'objectif principal est d'optimiser le dimensionnement de la structure de la machine en prenant en compte les forces axiales générées pendant l'usinage. Une méthodologie combinant modélisation théorique, simulation numérique et expérimentation est utilisée pour garantir la robustesse, la précision et la durabilité de la machine. Les résultats obtenus permettent de proposer des améliorations significatives dans la conception des machines CNC à 5 axes, offrant ainsi une meilleure performance et une plus grande fiabilité.



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le vaste univers de la fabrication mécanique, l'avènement de la technologie de commande numérique (CN) a ouvert de nouvelles perspectives en termes d'automatisation et de précision. En effet, la technologie d'usinage CNC a évolué au cours des trois dernières décennies, passant de machines-outils simples à des machines-outils à commande numérique (MOCN ou CNC) plus sophistiquées. En effet, les MOCN modernes sont des outils étonnants, capables de fabriquer des prototypes et des pièces mécaniques de manière rapide et fiable. Pour ce faire, elles doivent être capables de se déplacer sur plusieurs axes tout en conservant une précision dimensionnelle.

D'une manière générale, l'introduction des machines d'usinage multiaxes dans les lignes de fabrication mécanique offre des performances accrues en termes de productivité, précision, efficacité et fiabilité. Par exemple, les fraiseuses à commande numérique (CNC) à 3, 4 et 5 axes étant les plus courantes. Leurs mouvements déterminent les caractéristiques des pièces qui peuvent être réalisées et affectent également l'efficacité et la précision de la production. D'une manière générale, plus le nombre de degrés de liberté disponibles est élevé, plus les géométries qui peuvent être produites sont complexes. En outre, l'utilisation de ce type de machines permet une automatisation et une gestion complètes de la ligne de fabrication. En conséquence, de nombreux ateliers d'usinage modernes s'appuient sur cette technologie pour l'usinage de précision et assurer des prestations de service de qualité.

Par ailleurs, l'usinage CNC 5 axes est l'un des processus les plus avancés disponibles aujourd'hui. Il met en œuvre la technologie d'usinage soustractif pour offrir des possibilités infinies dans la mise en œuvre de pièces complexes. Cette technique utilise des outils de coupe qui fonctionnent sur cinq axes pour couper les pièces dans les formes et les tailles souhaitées. Cette procédure implique donc le mouvement des outils de coupe sur cinq axes simultanément. Les machines CNC à 5 axes offrent trois axes linéaires travaillant simultanément avec deux axes de rotation pour réaliser des pièces complexes. Les 5 axes permettent aux machinistes de fabriquer jusqu'à 5 faces en une seule opération. Cela rend le processus très efficace et précis et permet la mise en œuvre de structures et de

INTRODUCTION GENERALE

fonctionnalités complexes avec des configurations minimales. Étant donné que plusieurs pièces nécessitent un usinage constant de 5 faces, ce processus devient de plus en plus précieux pour plusieurs industries. Ces machines machines-outils à commande numérique 5 axes, initialement réservées aux industries de pointe, ont suscité par la suite un intérêt croissant dans des domaines variés tels que la menuiserie, le prototypage et bien d'autres encore. Elles représentent désormais une part significative du marché des machines-outils, en pleine expansion.

Ce mémoire de master s'inscrit dans le cadre de l'usinage CNC 5 axes. Les travaux rapportés dans ce manuscrit couvrent les différentes étapes suivies pour la mise en œuvre d'une petite fraiseuse à commande numérique à 5-axes pour le prototypage rapide. Notre objectif est de contribuer au développement d'une machine-outil capable de sculpter des matières légères (mousse plastique, bois, ...) avec la précision d'un artisan expérimenté et une aisance déconcertante. Cette machine doit offrir une flexibilité et une précision comparables à celles des machines professionnelles, mais à une fraction du coût. Notre motivation découle de deux aspirations principales. D'une part, nous sommes animés par le désir d'explorer les défis techniques et conceptuels associés à la conception et à la construction d'une machine CNC-5 axes. D'autre part, nous aspirons à démocratiser cette technologie, en offrant aux amateurs la possibilité de s'engager dans des projets de fabrication avancés, tout en favorisant l'innovation et la créativité. En outre, ce projet s'inscrit dans le cadre de différentes activités de recherche entreprises au niveau du Laboratoire Structures, au sein du département de mécanique de l'université de Blida 1 visant la réalisation de machines pilotées par ordinateur pour répondre à des besoins industriels précis et aussi développer des outils de soutien à la formation des étudiants de l'Université de Blida 1 en Conception et Fabrication Mécaniques.

Notre démarche de travail repose sur une approche itérative, combinant recherche documentaire approfondie, expérimentation pratique et exploitation rationnelle des ressources locales disponibles.

Le mémoire est organisé en quatre principaux chapitres. Dans, le premier chapitre nous expliquerons d'abord ce qu'est l'usinage 5 axes et comment le processus fonctionne. Nous verrons également les avantages et les

INTRODUCTION GENERALE

inconvénients de l'utilisation de ce processus d'usinage et de ses applications courantes. Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse fonctionnelle de notre machine. Le troisième chapitre abordera la conception mécanique de la fraiseuse CNC à cinq axes. Le quatrième chapitre concerne la mise en œuvre de la machine en abordant les parties électrique & informatique. Des réalisations de pièces seront présentées pour illustrer les capacités de la machine ainsi développée. Le manuscrit est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.



HISTORIQUE

"Évolution des machines-outils à commande numérique vers les 5 axes : Un tournant majeur dans l'histoire de l'usinage"

Les avancées novatrices initiées par Falcon et Jacquard à la fin du XVIII^e siècle ont marqué les débuts de la commande numérique, en démontrant la possibilité de contrôler les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé.

Leur métier à tisser de 1805 est ainsi devenu le précurseur de la commande numérique telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Cependant, l'intégration industrielle de la commande numérique est intimement liée aux progrès de l'électronique. En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons a réalisé des pales d'hélicoptère pour l'US Air Force en utilisant une méthode de reproduction. Cette méthode, consistant à percer de nombreux trous pour approcher le profil théorique, s'est avérée inadéquate pour les formes complexes des avions supersoniques à venir. C'est ainsi qu'il envisagea un usinage continu en trois dimensions.

Au printemps 1949, Parsons confia alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le développement des asservissements nécessaires pour piloter une machine à partir d'un lecteur de cartes. La fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale, capable de mouvements simultanés sur trois axes, fut officiellement présentée en septembre 1952 au Servomechanisms Laboratory du MIT, marquant l'avènement du concept de commande numérique (CN). Toutefois, il faudra encore quelques années et le soutien des chercheurs du MIT pour rendre opérationnelle la première machine-outil à commande numérique (MOCN).

L'évolution de la commande numérique vers les machines à 5 axes a été une étape significative dans l'histoire de l'usinage. Les premières expérimentations de machines CNC 5 axes ont eu lieu dans les années suivant l'introduction des premières CNC. Cependant, ce n'est qu'avec le développement des technologies de contrôle et des mécanismes d'entraînement appropriés que les machines CNC 5 axes sont devenues réalisables à grande échelle.

Les premières applications industrielles réussies de machines CNC 5 axes ont été observées dans les années 1970 et 1980, principalement dans l'industrie aérospatiale et automobile. Ces machines ont permis la fabrication de pièces complexes avec une précision et une efficacité accrues.

Au fil des décennies suivantes, les progrès technologiques ont continué à améliorer les performances et la polyvalence des machines CNC 5 axes. Les avancées dans les domaines de l'électronique, de la commande numérique et de la mécanique ont permis d'atteindre des niveaux de précision et de sophistication jamais atteints auparavant.

HISTORIQUE

Aujourd'hui, les machines CNC 5 axes jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la médecine et la fabrication d'outils. Leur capacité à réaliser des opérations d'usinage complexes sous différents angles a ouvert de nouvelles perspectives en termes de conception et de fabrication de pièces hautement complexes et précises.

-1960 : Les premières expérimentations et prototypes de machines-outils à commande numérique 5 axes.

-1970-1980 : Les premières applications industrielles réussies de machines CNC 5 axes, principalement dans l'industrie aérospatiale et automobile.

-1990 : Les avancées technologiques clés qui ont permis d'améliorer les performances et la précision des machines CNC 5 axes.

-2000 : Les entreprises ou les chercheurs ayant joué un rôle clé dans le développement et la popularisation de cette technologie.

-2010 à aujourd'hui : Les évolutions récentes et les tendances dans le domaine des machines CNC 5 axes.

CHAPITRE 1 :

**GENERALITES SUR L 'USINAGE
5 -AXES**

Introduction :

L'usinage CNC (Computer Numerical Control, commande numérique par ordinateur en français) est un procédé de fabrication soustractive, apparu en 1940. À l'image d'un sculpteur, la machine CNC va façonner une pièce en enlevant de la matière. Le principe de fonctionnement est simple : on conçoit la pièce avec la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), puis on transfère ce fichier dans un programme. Ce programme donnera les instructions à la machine numérique qui va exécuter les ordres et créer la pièce voulue.

La technologie de commande numérique par ordinateur a continuellement évolué, conduisant à des innovations qui remodelent les paysages manufacturiers. Parmi eux, la machine CNC 5 axes se distingue comme un outil de transformation, offrant une précision et une flexibilité inégalées dans les tâches d'usinage complexes. En permettant un mouvement simultané sur cinq axes différents, il transcende les capacités de ses prédécesseurs à 3 et 4 axes.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général de cette technologie, mettant en évidence les caractéristiques notables des machines CNC à 5 axes, leur classification, fonctionnement, systèmes d'asservissement, leurs avantages et leur rôle central dans le monde manufacturier d'aujourd'hui.

I. C'est quoi l'usinage 5-axes ^[1] :

Lorsqu'on utilise le terme "5 axes", on fait généralement référence à la capacité d'une machine CNC à déplacer une pièce ou un outil sur cinq axes différents, commandés numériquement et en même temps. Ainsi l'usinage 5-axes est procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière impliquant le mouvement relatif des outils de coupe par rapport à la pièce à usiner selon cinq axes simultanément : trois axes linéaires travaillant simultanément avec deux axes de rotation pour réaliser des pièces complexes. C'est une technique avancée de fabrication qui permet une grande liberté de mouvement et de précision. Les machines d'usinage 5 axes se distinguent par leur capacité à déplacer la pièce dans 5 degrés de liberté simultanément.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L 'USINAGE 5-AXES

Le nombre d'axes d'usinage est le nombre de directions selon lesquelles l'outil de coupe (ou la matière première) peut se déplacer pour créer le produit souhaité. Par exemple, les machines CNC conventionnelles ont des comptages à trois axes, leurs outils de coupe ne peuvent se déplacer que sur les axes X, Y et Z (Fig1). Les machines 3-axes sont idéales pour un enlèvement de matière rapide et efficace et pour la réalisation de surfaces planes ou plates. Ces formes géométriques sont dites prismatiques, essentiellement rectilignes, par opposition aux formes plus complexes. Oui, une fraiseuse à 3 axes peut réaliser des profils arrondis, mais elle n'est pas idéalement adaptée à cette tâche.

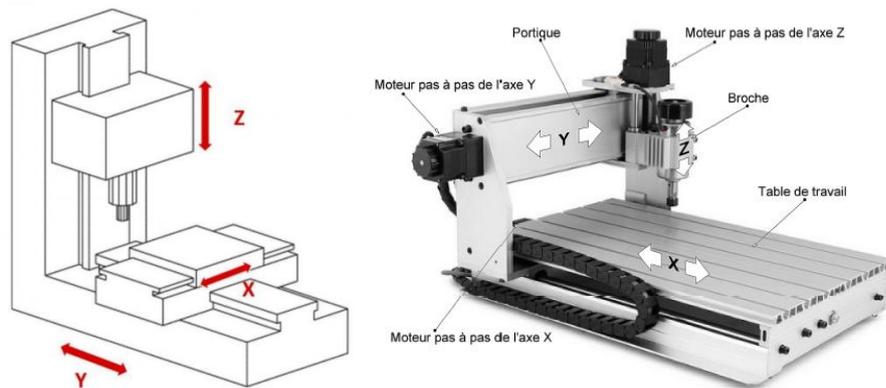


Figure 1. Les axes mobilisés pour un usinage conventionnel à 3 axes

L'ajout d'un quatrième axe de mouvement ouvre de nombreuses nouvelles possibilités d'usinage. Cela se fait généralement par l'ajout d'un mouvement rotatif le long de l'axe X (Fig2). Cette rotation supplémentaire le long de l'axe X est appelée "mouvement de rotation". Cette rotation supplémentaire le long de l'axe X s'appelle l'axe A.

La table rotative permet au machiniste de monter une pièce sur une extrémité, puis de la faire tourner pour accéder aux autres côtés de la pièce. Cela évite le problème du remontage et de la ré indexation que vous auriez sur une fraiseuse à 3 axes.

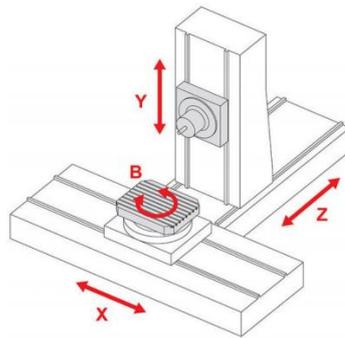


Figure 2. Les axes mobilisés pour une usinage à 4 axes

Afin de fabriquer des pièces toujours plus sophistiquées rapidement et avec un minimum de réglage, il faut avoir plus d'axes. On peut encore ajouter un autre degré de liberté, cette fois le long de l'axe Y : une rotation ou une inclinaison autour de Y à la broche de l'outil ou à la plate-forme de maintien de la pièce. La rotation autour de Y est appelée l'axe B. Ainsi les cinq mouvements possibles sur une machine 5-axes sont donnés dans le tableau 1. Il est maintenant possible pour les opérateurs de réaliser cinq faces en une seule opération. Pratiquement, pour déterminer les trajectoires de l'outil, le modèle CAO est introduit dans le logiciel FAO, qui crée ensuite des codes qui indiquent à la machine la vitesse de l'outil de coupe et le mouvement de l'outil. Ainsi, la machine 5 axes peut fonctionner dans le système de coordonnées 5 axes, y compris X, Y, Z, A et B (Z étant parallèle à la broche de l'outil). Cela signifie que le point d'excellence de l'usinage CNC à 5 axes réside dans sa capacité à créer des formes complexes à travers une seule et même configuration, réduisant par extension le temps de travail de l'opérateur, tout en augmentant les taux de production et en permettant d'obtenir des pièces plus précises et superficiellement beaucoup mieux finies.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'USINAGE 5-AXES

axe X	fonctionne de gauche à droite	
axe Y	fonctionne d'avant en arrière	
axe Z	fonctionne de haut en bas	
Axis A	tourne autour de l'axe X (s'incline vers l'arrière et vers l'avant)	
Axe B	Tourne autour de l'axe Y (s'incline et tourne de gauche à droite)	

Tableau 1. Les cinq mouvements possibles sur une machine 5-axes

Différentes architectures de la machine 5-axes sont donc possibles. La figure 3 illustre quelques configurations possibles des axes mobiles

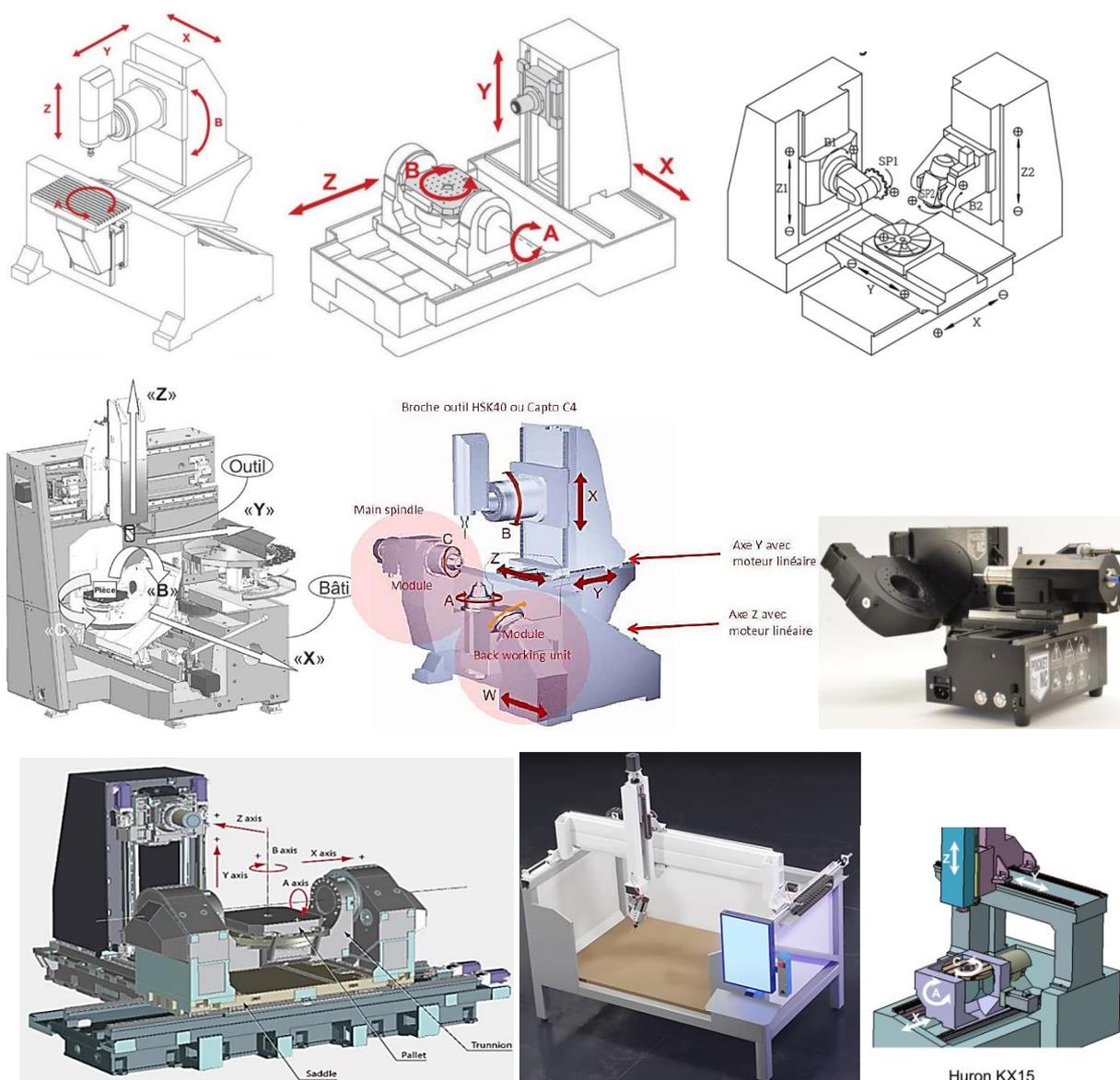


Figure 3. Différentes configurations des axes mobiles sur une machine cnc 5

II. Classification des machine cnc 5-axes [2]:

La classification des machines CNC à 5 axes peut se faire selon différents critères, tels que leur configuration mécanique, leur utilisation industrielle ou leur technologie de commande. Voici une classification générale basée sur la configuration mécanique :

Machines à Portique : Ces machines ont une structure de portique où le portique se déplace sur une paire de colonnes fixes. Elles offrent une grande stabilité et sont souvent utilisées pour l'usinage de pièces de grandes dimensions, telles que des moules de fabrication.

Machines à Table Rotative : Ces machines ont une table rotative qui permet à la pièce de tourner autour d'un axe vertical (A ou B) pendant l'usinage. Elles sont souvent utilisées pour l'usinage de pièces symétriques ou pour l'usinage de contours complexes sur des pièces cylindriques.

Machines à Tête Pivotante : Ces machines ont une tête de fraisage pivotante qui peut pivoter autour de plusieurs axes pour atteindre différentes orientations d'outil. Elles sont souvent utilisées pour l'usinage de pièces complexes nécessitant un accès sous différents angles.

Machines à Tête Mobile : Ces machines ont une tête de fraisage mobile qui peut se déplacer le long de plusieurs axes linéaires en plus de pivoter autour des axes A et B. Elles offrent une grande flexibilité pour l'usinage de pièces de forme complexe.

Ces catégories peuvent parfois se chevaucher, et les machines peuvent être classées différemment en fonction des caractéristiques spécifiques de leur conception et de leur utilisation.

Par ailleurs, il faut noter que l'usinage 5-axes peut être exécuté selon deux modes : l'usinage simultané 5 axes et l'usinage 3+2. En **usinage simultané 5 axes**, les trois axes linéaires de l'outil de la machine (X, Y et Z) et deux axes rotatifs (A et B) travaillent simultanément pour effectuer un usinage complexe sur la pièce. Avec l'**usinage 3+2**, la machine exécute un programme de fraisage 3 axes avec l'outil d'usinage verrouillé en position inclinée, utilisant ses deux axes rotatifs. Le

processus, également connu sous le nom **d'usinage 5 axes positionnés**, repose sur les quatrième et cinquième axes pour orienter l'outil d'usinage dans une position fixe, plutôt que de le manipuler en continu pendant le processus d'usinage.

III. Comment Fonctionne une Machine CNC à 5-Axes ? ^[2]

Une machine de fraisage CNC à 5 axes fonctionne automatiquement avec une intervention humaine minimale. Elle utilise des outils de coupe rotatifs pour façonner les matériaux placés sur le plateau de la machine.

Cependant, la mise en place du matériau sur le plateau est la dernière phase du processus d'usinage CNC à 5 axes. En fait, L'élaboration de pièces de formes complexes par usinage 5 axes est un processus complexe, constitué principalement des étapes suivantes (fig 4).

- La première étape de l'usinage CNC à 5 axes consiste à créer un design CAO de la pièce. La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui permet de définir la géométrie de la pièce à produire.

- Ensuite, il y a lieu de traduire ce modèle CAO en FAO. La FAO, ou fabrication assistée par ordinateur, est un logiciel qui aide à générer le langage alphanumérique CNC ou le code G. Donc, la FAO permet de programmer les trajets d'usinage.

- La phase suivante du processus consiste à télécharger le code G dans la machine 5 axes à commande numérique (CN). Le code G est très important car il contient des instructions qui orientent la machine sur le chemin de l'outil et l'outil approprié pour l'usinage. Donc, la Commande Numérique (CN) génère les consignes de mouvement des axes de la machine.

- En exécutant, les ordres provenant de la CN, la machine-outil permet effectivement de produire la pièce usinée en combinant les mouvements de coupe et d'avance, cela en simultané ou en « 3+2 », l'usinage qui permet de faire les enlèvements de matière nécessaires à l'obtention de la pièce usinée.

- Le système d'asservissement est responsable de la coordination des mouvements des axes de la machine pour atteindre les coordonnées spécifiées. Les

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'USINAGE 5-AXES

systèmes d'asservissement peuvent être de type direct, inverse ou combiné, dépendant de la machine et de ses spécifications.

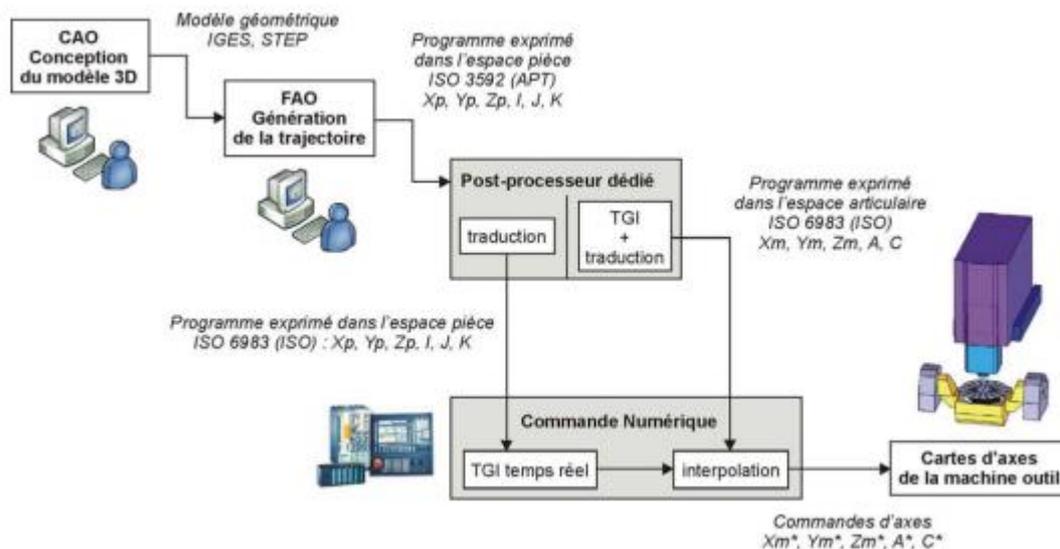


Figure 4 : Chaîne numérique en 5 axes

Le contrôle de vitesse et de position est essentiel pour assurer une précision optimale. Les machines CNC 5 axes sont équipées de systèmes de contrôle avancés qui permettent de réguler les vitesses et les positions pour répondre aux exigences spécifiques des pièces à usiner. Le logiciel de programmation est utilisé pour définir les mouvements des axes et les paramètres de coupe. Les logiciels de programmation CNC, tels que G-Code, permettent de contrôler les mouvements des axes et les paramètres de coupe pour produire des pièces précises.

IV. Avantages de l'Usinage CNC à 5 Axes^[1] :

La capacité de ce type d'usinage à travailler sur 5 faces différentes d'une pièce simultanément offre plusieurs avantages à de nombreuses industries. En effet, l'usinage 5 axes apporte de nombreux bénéfices qui vont de l'efficacité économique à l'usinage efficace. En agissant sur différentes positions, on travaille sur les trois dimensions de la pièce pour optimiser chaque paramètre de l'usinage. Voici les principaux avantages de l'usinage CNC à 5 axes.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L 'USINAGE 5-AXES

- **Usiner des Formes Complexes :** Les axes supplémentaires facilitent l'usinage de conceptions et de géométries à haute complexité. En effet, l'usinage d'angles et d'arcs difficiles, auparavant réalisable à l'aide de plusieurs dispositifs spéciaux, est devenu possible avec les machines CNC à 5 axes. La capacité de la machine 5-axes à faire pivoter les pièces pendant une seule opération permet d'obtenir les géométries souhaitées sans avoir besoin de machines ou de dispositifs complexes.

- **Haute Précision et Répétabilité :** L'usinage CNC à 5 axes implique des configurations minimales, éliminant ainsi la possibilité d'erreurs tout en améliorant la précision. De plus, avec la plupart des machines CNC à 5 axes utilisées aujourd'hui par les machinistes, il n'est pas nécessaire de repositionner manuellement la pièce pendant l'usinage. Cela garantit une meilleure tolérance d'usinage. De plus, l'utilisation d'outils de coupe plus courts dans certaines configurations de machines améliore la durée de vie des outils tout en assurant la répétabilité.

- **Opérations de Configuration Efficaces et Réduction des réglages :** Le processus de configuration d'une machine CNC à 5 axes est relativement plus facile que celui d'une machine à 3 axes. La fabrication de pièces complexes sur une machine CNC 3 axes implique plusieurs étapes. La pièce passe par différents processus, comme la rotation manuelle de la pièce, car le nombre d'options disponibles est minime et le mouvement de l'outil est limité. En outre, l'usinage CNC 3 axes implique l'installation de la pièce sur le montage avant l'usinage dans l'orientation requise pour la fonction souhaitée. En revanche, ce processus est éliminé dans une machine CNC à 5 axes. La pièce n'a pas besoin de fixations supplémentaires car la pièce doit être fixée et opérée une fois pour être usinée. En fait, les machines CNC à 5 axes permettent de travailler sur cinq surfaces simultanément et très peu d'étapes sont nécessaires pour façonner le matériau dans le produit requis avec des dimensions géométriques complexes.

- **Finition de Surface de Qualité :** La finition de surface avec une machine CNC à 5 axes est plus lisse en raison de la présence d'axes supplémentaires. Ces axes supplémentaires rapprochent la pièce de la fraise, facilitant ainsi l'obtention des formes souhaitées. Cela permet également l'utilisation d'outils de coupe plus courts pour l'usinage. Aussi, avec des outils de coupe plus courts, il y a peu ou pas

de vibrations, ce qui réduit l'incidence des marques sur la surface des produits finis. De plus, il y a une amélioration de l'utilisation de la broche pour l'usinage de surfaces inclinées lors de l'utilisation du processus d'usinage vertical.

- **Haute Efficacité de Production** : L'usinage à 5 axes peut efficacement réduire le temps d'usinage et le temps auxiliaire des pièces. Il dispose d'une large plage de vitesses de broche et de taux d'avance, on parle même d'usinage à grande vitesse, permettant ainsi à la machine d'offrir une grande capacité de coupe puissante.

- **Enlèvement rapide du matériau** : La machine CNC à 5 axes permet de réduire le temps de cycle. Cela est essentiellement dû à sa capacité à permettre à l'outil de rester tangent à la surface de la pièce.

- **Usure réduite des outils et durée de vie accrue des outils** : Une caractéristique souvent sous-estimée de la machine CNC 5 axes est son impact sur la durée de vie des outils. Grâce à la capacité de la machine à maintenir des positions de coupe optimales et des charges de copeaux constantes, l'usure des outils est considérablement réduite. La machine peut se positionner de manière à ce que l'engagement de l'outil reste cohérent, garantissant ainsi une charge uniforme sur l'outil. Cette uniformité ne conduit pas seulement à de meilleures finitions, mais garantit également que les outils eux-mêmes durent plus longtemps. Pour les industries où la précision est primordiale et où le remplacement des outils peut être coûteux, cette durée de vie prolongée de l'outil peut entraîner des économies considérables.

V. Inconvénients de l'usinage CNC 5 axes ^[1]:

Dans un passé récent, la machine CNC 5 axes s'est fait un nom sur le marché. À mesure que les exigences de produits plus complexes évoluent, les industries de fabrication et de production passent rapidement aux machines CNC à 5 axes. Bien que ces machines offrent des processus rapides, multi-axes et une bonne rigidité, leur application dans l'industrie est en quelque sorte minimisée en raison des aspects suivants.

- **Programmation complexe nécessaire :** La machine CNC à 5 axes a un traitement complexe par rapport à la machine CNC à 3 axes. Trois mouvements linéaires, deux mouvements de rotation et d'autres trajectoires complexes ne sont pas faciles à comprendre et à imaginer. Par conséquent, une personne très formée et expérimentée doit faire cette programmation complexe. Toute erreur de programmation peut même réduire la précision d'usinage et la qualité de surface.

- **Machines coûteuses :** Le prix des machines 5 axes est bien plus élevé que celui des machines 3 axes disponibles sur le marché. De plus, le logiciel nécessaire est coûteux, ce qui rend la machine 5 axes très chère. La maintenance de la machine 5 axes est aussi complexe que d'autres machines simples, ce qui augmente encore le coût de cette technologie. Dans ce sens, le produit fabriqué sur une machine CNC à 5 axes peut coûter plus cher que le produit similaire fabriqué sur la machine à 3 axes.

- **Opérateur hautement qualifié requis :** La machine CNC à 5 axes implique une technologie de traitement complexe, de la programmation à l'usinage, qui nécessite un opérateur technique hautement qualifié pour diriger le processus d'usinage. Cela rend également la machine 5 axes incompatible pour certaines industries car le coût de la main-d'œuvre est incontrôlable.

- **Sécurité et prévention des collisions :** Les machines CNC à 5 axes doivent être équipées de systèmes avancés de détection et d'évitement des collisions. Compte tenu de la complexité des opérations effectuées par ces machines, il existe toujours un risque que l'outil entre en collision avec la pièce ou avec la machine elle-même. Des capteurs avancés et des algorithmes logiciels fonctionnent en tandem pour prédire les collisions potentielles et ajuster les mouvements de la machine pour les éviter.

VI. Domaines d'utilisation [3]:

L'usinage CNC à 5 axes est idéal pour créer des pièces qui nécessitent des géométries extrêmement complexes, une haute qualité, des tolérances serrées, voire même pour réaliser un usinage traditionnel sur des surfaces gauches ou inclinées. Cette technique d'usinage intéresse bien des secteurs de l'industrie mécanique en plus de l'aéronautique et automobile, il convient de souligner qu'elle a d'abord séduit le secteur de la fabrication des gros moules et matrices complexes à cavités

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L 'USINAGE 5-AXES

profondes où le recours nécessaire à des outils longs et sujets à fléchissement entraînait des vibrations, donc du broutage. Les industries citées dans le tableau 1.2 utilisent régulièrement l'usinage à 5 axes.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'USINAGE 5-AXES

<i>Industrie</i>	<i>Description</i>	<i>Applications clés</i>
<i>Automobile</i>	Alors que la conception automobile évolue pour incorporer des caractéristiques complexes pour des raisons à la fois esthétiques et fonctionnelles, l'industrie automobile s'appuie fortement sur l'usinage 5 axes.	Composants de moteur, agencements sur mesure et fabrication ancienne pour intérieurs.
<i>Aéronautique</i>	L'un des secteurs pionniers dans l'utilisation des MOCN 5-axes est l'industrie aéronautique qui exige de nombreuses pièces mécaniques de formes complexes (gauches) que ce soit dans les moteurs, les hélices, pales, la structure, qui ne sont pas facilement réalisables avec les procédés classiques et exigent, souvent, des opérations difficiles avec des outils longs et minces, voire avec des rallonges d'outils.	Lors de la fabrication de composants tels que des aubes de turbine, la capacité à usiner des courbes complexes et des angles précis est cruciale. Cette précision affecte non seulement l'efficacité du composant mais également la sécurité de l'ensemble de l'avion.
<i>Droit médical</i>	Le secteur médical nécessite des composants à la fois précis et biocompatibles.	Implants dentaires, appareils orthopédiques et outils chirurgicaux spécialisés
<i>Bijoux et art</i>	Au-delà des industries lourdes traditionnelles, les artisans se tournent vers l'usinage 5 axes pour leur artisanat. Les créations de bijoux complexes ou les sculptures qui allient talent artistique et précision bénéficient énormément de cette technologie.	Conceptions de bijoux détaillées et sculptures complexes
<i>Recherche & Développement</i>	Dans des domaines tels que la science des matériaux ou la recherche mécanique, des composants personnalisés sont souvent nécessaires. La flexibilité et la précision de l'usinage 5 axes sont essentiels pour les chercheurs travaillant sur des prototypes ou d'autres outils et équipements spécialisés.	Composants personnalisés pour les expériences en science des matériaux, prototypes pour la recherche mécanique et équipements spécialisés pour divers besoins de recherche.

Tableau 2. Domaines d'application de l'usinage CNC à 5 axes

Conclusion :

Ce chapitre a présenté la technologie des machines CNC à 5 axes. L'impact de la machine CNC 5 axes sur l'industrie manufacturière est profondément transformateur. Cette technologie révolutionnaire offre une précision inégalée en permettant des mouvements sur cinq axes, garantissant des produits finis d'une qualité exceptionnelle et des tolérances extrêmement serrées. Sa polyvalence élargie permet l'usinage de pièces sous des angles et des orientations multiples, ce qui élargit considérablement la gamme de produits fabriqués tout en réduisant les opérations nécessaires.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L 'USINAGE 5-AXES

Par conséquent, les entreprises bénéficient d'une réduction significative des coûts et des délais de production, renforçant ainsi leur compétitivité sur le marché mondial. De surcroît, la machine CNC 5 axes ouvre de nouvelles perspectives dans la conception et l'innovation, permettant aux concepteurs de repousser les frontières de la création en développant des pièces complexes et innovantes. En optimisant les processus de fabrication, elle contribue également à améliorer l'efficacité opérationnelle globale des entreprises, renforçant leur productivité et leur rentabilité.

Sur la base des connaissances acquises dans ce premier chapitre, nous allons aborder, dans le prochain chapitre, l'analyse fonctionnelle de la machine 5-axes qu'on projette réalisée.

Chapitre 2 :

Analyse fonctionnelle de la MOCN

-5- axes

Introduction

L'analyse fonctionnelle est une étape essentielle dans le développement de tout produit ou machine complexe comme une machine CNC 5 axes. Elle permet de définir et de comprendre les fonctions nécessaires pour satisfaire les besoins des utilisateurs, en intégrant les contraintes techniques, économiques et réglementaires. Ce chapitre présente une analyse fonctionnelle détaillée de la machine mini fraiseuse CNC 5 axes que nous allons mettre en œuvre.

L'analyse fonctionnelle permet de décrire un système par les fonctions qu'il doit remplir, mais aussi les contraintes qui vont subir. Elle consiste à rechercher, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions. Ces fonctions ne servent pas seulement à générer les spécifications fonctionnelles, mais elles ont aussi un rôle important à jouer dans la définition des sous-systèmes du produit et la recherche des concepts. Elle comporte l'analyse externe et l'analyse interne. L'analyse fonctionnelle est divisée en deux parties : analyse fonctionnelle externe et analyse fonctionnelle interne.

Dans l'analyse fonctionnelle externe, on exprime le besoin de l'utilisateur du produit sous forme de fonctions de service. Ainsi, on énoncera d'abord le besoin en utilisant le « diagramme bête à cornes » et par la suite on verra de près sa faisabilité à travers le « diagramme pieuvre ». En fait, à travers le diagramme pieuvre on identifiera les fonctions service (Fonctions contraintes) du produit ciblé.

Dans l'analyse fonctionnelle interne, on convertit les fonctions de service vers des fonctions techniques, cela veut dire qu'on doit chercher les solutions techniques permettant de réaliser les fonctions de service déjà identifiées cela peut être fait en utilisant différents diagrammes comme Le FAST, SADT, ou le diagramme fonctionnel.

I. Mise en situation :

Avant d'aller plus loin dans l'analyse fonctionnelle de notre machine, il est utile de rappeler le contexte de la problématique considérée. Il s'agit de l'usinage par enlèvement de matière qui est une étape cruciale dans les processus de fabrication mécanique de pièces complexes, particulièrement dans l'industrie

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

mécanique. Les machines-outils, et plus spécifiquement les centres d'usinage, sont les équipements utilisés pour ces opérations. La formation de surfaces par usinage est réalisée à l'aide d'un outil tranchant qui se déplace par rapport à la pièce fixée sur la machine. Ce déplacement est appelé "mouvement d'avance".

L'enlèvement de matière par une machine cnc (ou MOCN) 5-axes est une méthode d'usinage spécifique où l'outil doit non seulement se déplacer par rapport à la pièce mais également tourner sur lui-même pour couper la matière, ce qui constitue le "mouvement de coupe". L'usinage de formes complexes nécessite des machines-outils spécialisées capables d'exécuter plusieurs mouvements simultanés, en l'occurrence :

- des déplacements linéaires de l'outil par rapport à la pièce dans les trois directions orthogonales (X, Y, Z),
- des rotations de l'outil par rapport à la pièce autour de deux axes supplémentaires.

Dans le cadre de la conception d'une machine CNC 5 axes, chaque "axe" représente un système qui contrôle un mouvement spécifique de l'outil par rapport à la pièce. Un axe est constitué de plusieurs éléments, entre autres :

- un moteur, également appelé actionneur,
- un élément mobile dont le déplacement est contrôlé,
- un mécanisme de transmission de mouvement entre le moteur et l'élément mobile,
- des capteurs, généralement pour la commande et le control de la vitesse et de la position.

Ces éléments regroupés sous différentes architectures et pilotés par une Commande Numérique CN moderne permettent une flexibilité et une précision accrues, rendant possible la réalisation de géométries complexes et des finitions de haute qualité.

Sur le marché, on retrouve différentes machines CNC 5 axes, de différentes puissances, de différentes tailles et ayant différentes cinématiques. La machine CNC 5 axes que nous désirons développer permet l'usinage de formes complexes grâce à une architecture comprenant :

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

- 03 axes de translation permettant le mouvement de l'outil par rapport à la pièce, notés X, Y, et Z,
- 02 axes de rotation pour de l'outil, notés A et B,

La cinématique de la machine ciblée est similaire à celle de la figure 5.

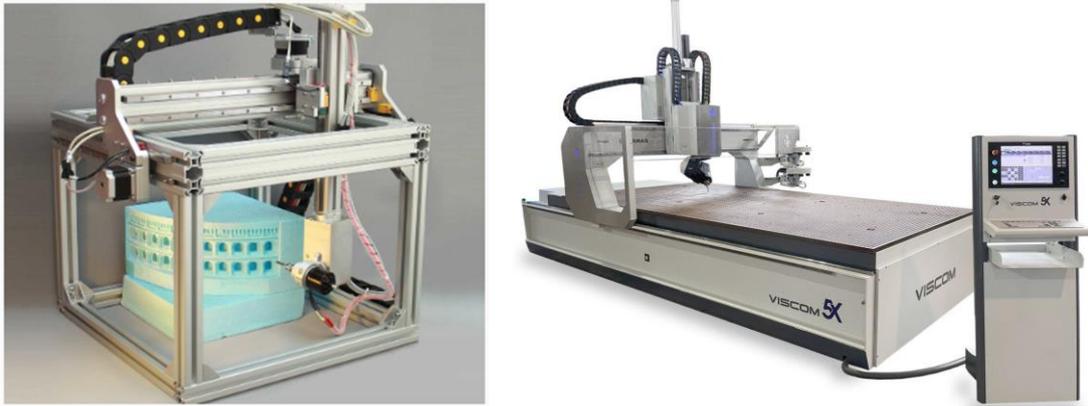


Figure 5 : Modèles de MOCN-5axes similaires à celle qu'on désire réaliser

En fait, On a à concevoir une mini machine fraiseuse CNC ayant une architecture principale de type série avec cinq degrés de liberté comme le montre la figure 6.

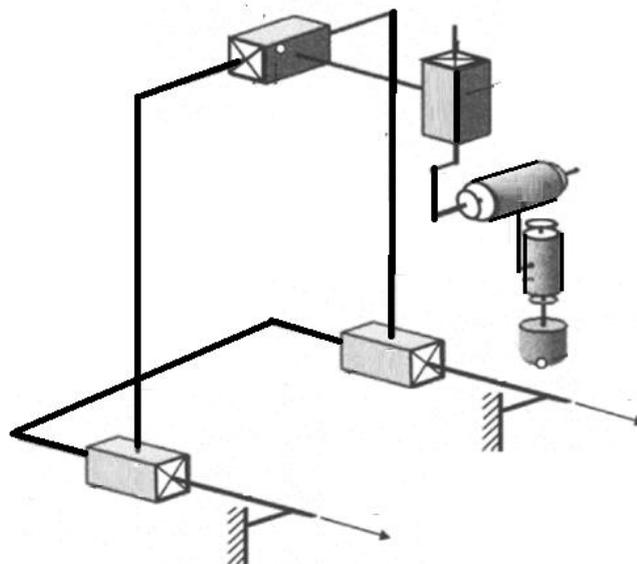


Figure 6 : chaîne cinématique de la MOCN 5axes ciblée

II. Analyse fonctionnelle externe [19]:

A. Expression du besoin

Dans un premier temps, On doit d'abord saisir de façon claire et précise le besoin. Ainsi, pour vérifier que le produit ciblé répond effectivement à un besoin réel, on doit répondre aux questions classiques suivantes :

- A qui le produit rend-il service ? le système rend service à l'opérateur .
- Sur quoi le produit agit-il ? le système agit sur la matière brute.
- Dans quel but ? dans le but d'usiner des pièces mécaniques de forme complexe avec précision.

On obtient ainsi le diagramme Bête à cornes suivant

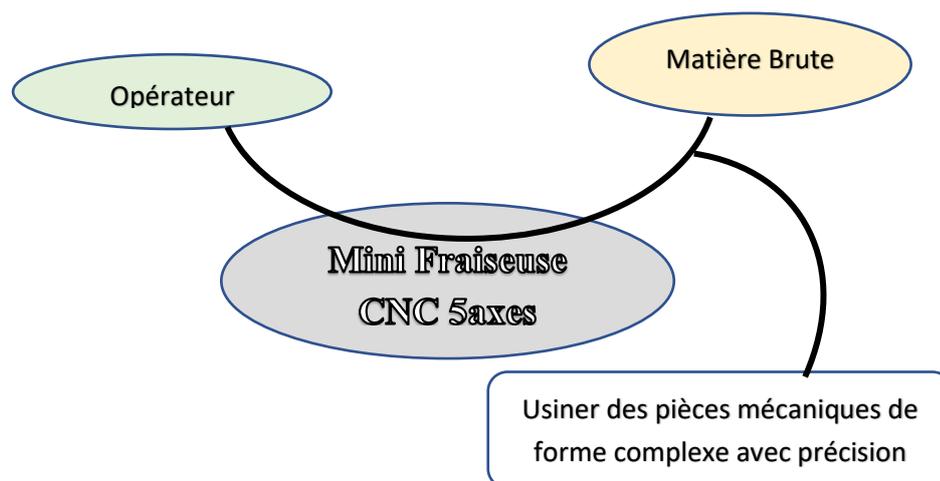


Figure 7: diagramme Bête à cornes du produit ciblé

Pour valider la formulation du besoin, il faut se poser des questions supplémentaires suivantes :

Pourquoi le système existe-t-il ?

- Usinage des pièces mécaniques de forme complexe avec une bonne précision qu'on ne peut pas réaliser sur des machines conventionnelles
- Usinage des pièces mécaniques de forme complexe difficilement réalisables sur des machines à 3 ou 4 axes.

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

- Réalisation de la gravure sur des surfaces gauches pour des objets décoratifs ou des bijoux
- Réalisation de gabarit en bois ou polystyrène pour le moulage en sable.
- Opérations de sculptage sur des pièces en bois pour la menuiserie.
- etc

Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître ou évoluer le besoin ?

Cette question permet de valider la stabilité du besoin, elle permet aussi d'anticiper les évolutions du besoin.

- Une forte demande du marché dans le domaine de la gravure et la décoration des pièces de valeurs de forme complexes.
- Un coût abordable par rapport à des machines de grandes dimensions.
- Un investissement accessible à de nombreux artisans (bijoutiers, menuisiers, plâtriers, etc) et aux professionnels (fabrication mécanique, moulage, etc).

Dans le tableau 3, nous avons regroupé les besoins explicites de ce type de machine avec une description des fonctions qu'une mini fraiseuse CNC 5-axes doit remplir.

Besoins (N)	Fonctions désirées	Description
1. Créer des prototypes précis et rapides.	Usinage de précision	Permet de réaliser des prototypes avec une grande précision, indispensable pour des essais rapides et fiables.
2. Concevoir des présentoirs personnalisés et économiques.	Usinage de formes complexes	Permet de créer des formes uniques et sur mesure pour des projets de publicité et d'exposition
3. Fabriquer des éléments décoratifs légers pour la construction.	Usinage de matériaux légers	Spécialement adapté pour l'usinage de panneaux et d'éléments en mousse rigide pour le bâtiment.
4. Créer des décors pour le cinéma et les théâtres.	Sculpture rapide de matériaux légers	Permet de sculpter des décors rapidement, idéal pour les productions temporaires.

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

5. Prototyper des projets éducatifs	Usinage de prototypes éducatifs	Permet de fabriquer des maquettes et des modèles éducatifs avec des matériaux légers
6. Réaliser des sculptures et œuvres d'art.	Usinage de matériaux artistiques	Permet de créer des sculptures avec des détails fins en matériaux légers comme la mousse.

Tableau 3. Besoins effectifs pour le produit ciblé.

L'évolution technologique de ce type de fraiseuses CNC à 5 axes (nouvelle technologie) semble aujourd'hui encore limitée ou inexistante. A cet effet, dans le contexte décrit ci-dessus, le risque de disparition du besoin est faible. Donc, le besoin est validé et par conséquent, le projet est viable.

B. Identification des fonctions de service

L'analyse fonctionnelle externe repose sur l'identification des éléments du milieu extérieur de notre produit. L'analyse de l'environnement du système permet d'abord d'identifier les composantes extérieures (tout ce qui est en contact direct ou indirect avec le produit) et par la suite, d'établir les relations entre le produit et les composantes extérieures en termes de fonctions appelées fonctions de service. Le résultat de cette phase est généralement représenté sous forme de diagramme dit Pieuvre (voir Fig. 8).

Le diagramme Pieuvre, aussi connu sous le nom de diagramme des interactions, est un outil de modélisation graphique utilisé principalement dans les domaines de la gestion de projet, de l'ingénierie des systèmes, et de la conception assistée par ordinateur (CAO). Le principal objectif de ce diagramme est de clarifier la portée et les limites d'un système, en mettant en évidence les interactions avec l'environnement extérieur. Les fonctions de service retenues pour le reste de l'étude se décomposent en : Fonctions principales notées FP et les fonctions contraintes notées FC, elles sont regroupées dans le tableau 4.

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

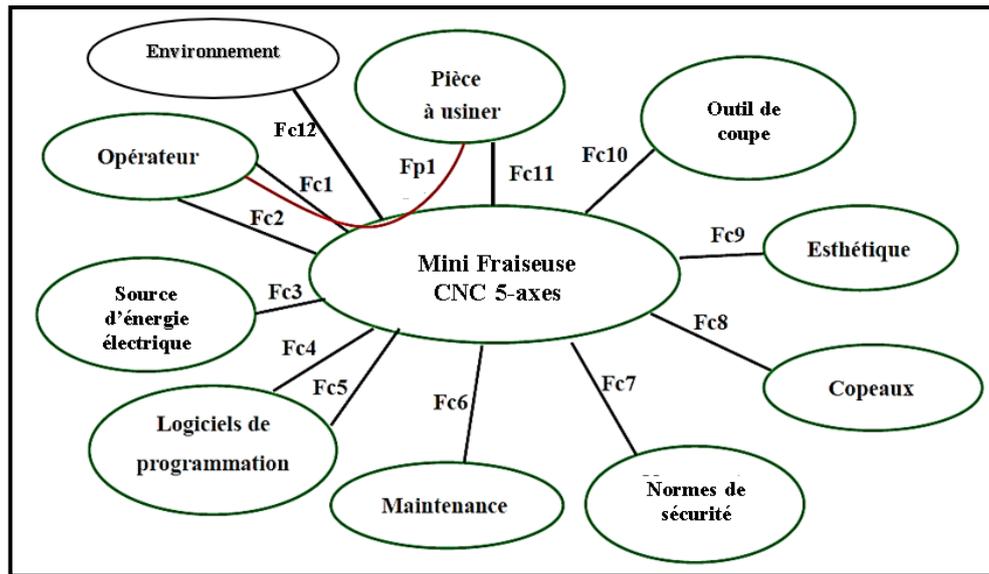


Figure 8 : Diagramme Pieuvre du produit ciblé

Référence	Description
Fp1	Usiner des pièces mécaniques de forme complexe avec précision.
Fc1	Protéger l'utilisateur de tout danger potentiel.
Fc2	Faciliter l'exploitation de la machine.
Fc3	Utiliser une source d'énergie électrique ordinaire.
Fc4	Utiliser des logiciels Open source pour faciliter la programmation.
Fc5	Utiliser le G-code.
Fc6	Faciliter la maintenance et l'entretien de la machine.
Fc7	Respecter les normes de sécurité en vigueur.
Fc8	Faciliter la récupération des copeaux.
Fc9	Prendre en considération de l'aspect esthétique.
Fc10	Faciliter le montage et le démontage de l'outil.
Fc11	Faciliter la fixation de la pièce sur la machine.
Fc12	Eliminer l'utilisation de produits dangereux pour l'environnement.

Tableau 4. Les Fonctions de service de notre produit

III. Analyse fonctionnelle Interne ^[19]:

L'analyse fonctionnelle interne expose le point de vue concepteur, qui est chargé de fournir le produit répondant aux besoins déjà exprimés et validés. Le système n'est plus considéré comme une boîte noire, mais au contraire l'analyse va porter sur l'intérieur de la boîte pour comprendre ses fonctionnalités internes. Le système est considéré comme un assemblage de constituants dont chacun remplit certaines fonctions vis-à-vis des autres. Ce type d'analyse met en

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

évidence les fonctions techniques en élaborant généralement des diagrammes de type FAST et SADT. En fait, un diagramme FAST présente une traduction rigoureuse de chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) constructive(s). Le diagramme FAST se construit de gauche à droite, dans une logique du pourquoi au comment. Grâce à sa culture technique et scientifique, l'ingénieur développe les fonctions de service du produit en fonctions techniques. Il choisit des solutions pour construire finalement le produit.

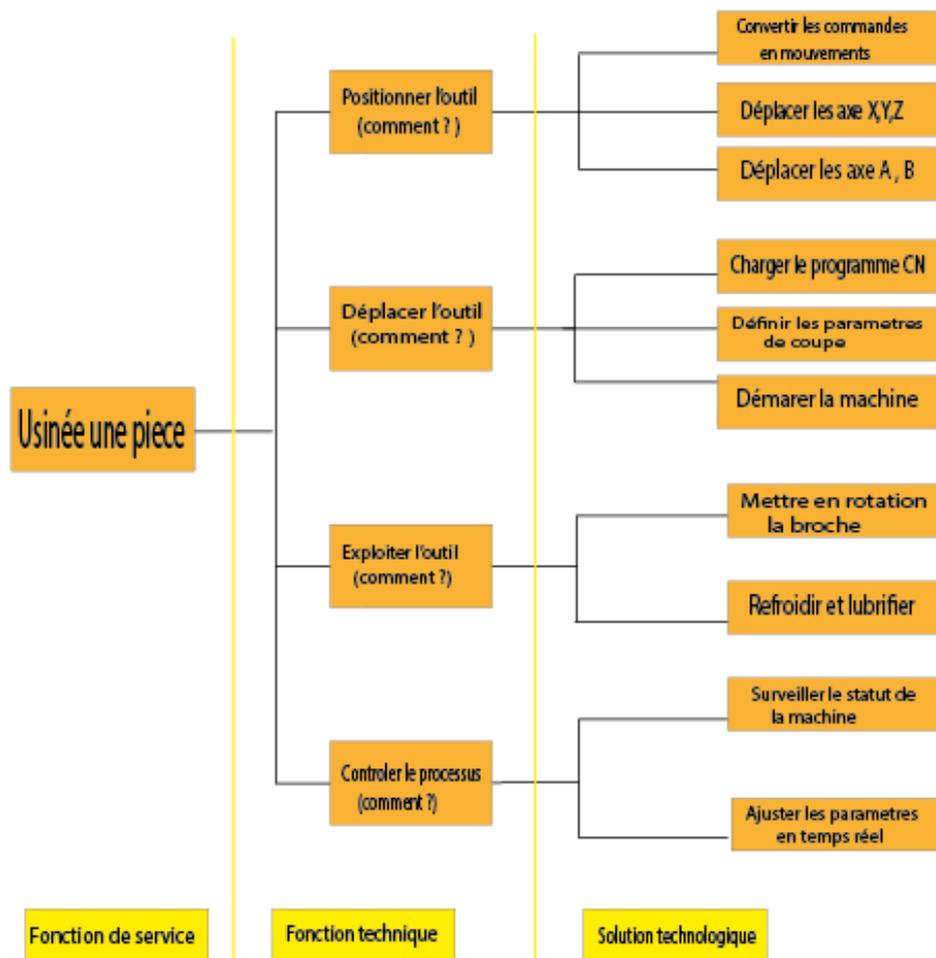


Figure 9. Diagramme Fast de la Machine

Le diagramme FAST constitue alors un ensemble de données essentielles permettant d'avoir une bonne connaissance d'un produit complexe et ainsi de pouvoir améliorer la solution proposée.

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

La figure 9 illustre le diagramme FAST de la fonction principale « Usiner des pièces mécaniques de forme complexe avec précision » de notre machine.

Par ailleurs l'analyse descendante du système permet d'établir les diagrammes SADT de différents niveaux. Pour notre machine on a :

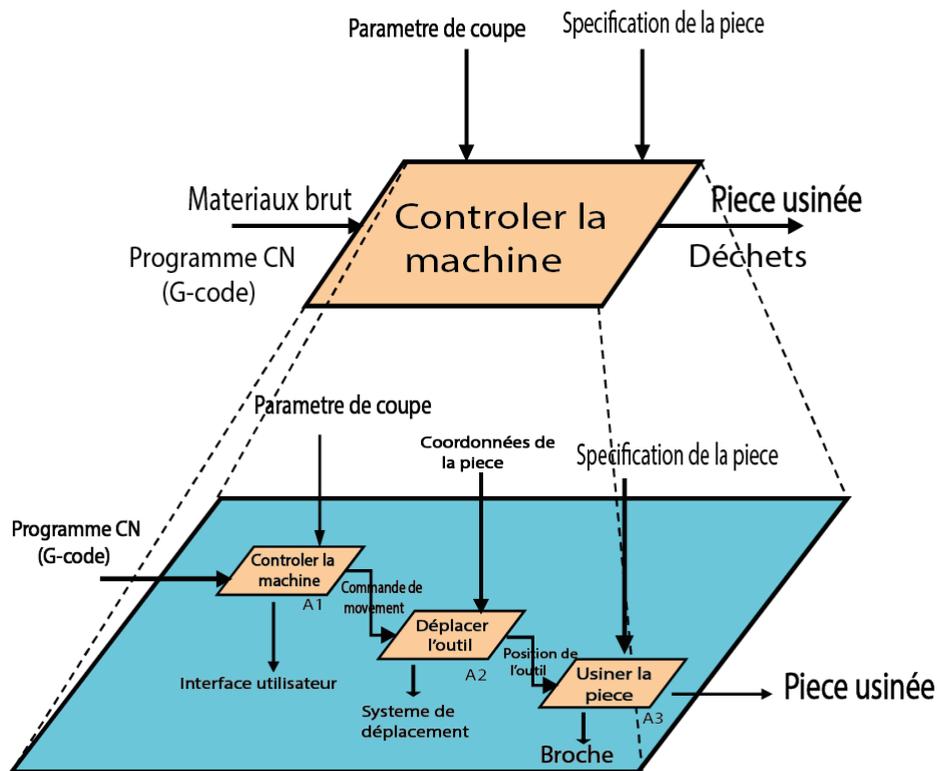


Figure 10. Diagramme SADT de la Machine

IV. élaboration du Cahier des charges fonctionnel du produit [19]:

Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est un document formalisant un besoin, en détaillant les fonctionnalités attendues du système, ainsi que les contraintes (techniques, réglementaires, budgétaires...) auxquelles il est soumis. Le CdCF est résumé dans le tableau suivant.

Chapitre 2 : Analyse fonctionnelle de la MOCN-5-axes

Fonction	Critère d'appréciation	Niveau
Usiner des pièces mécaniques de forme complexe avec précision	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement de l'outil par rapport au bâti • Orientation de l'outil par rapport au bâti 	<ul style="list-style-type: none"> • Système vis-écrou (filetage trapézoïdale, pas 2mm, diam 8mm) • Entraînement directe pour la rotation
Sécuriser le système	<ul style="list-style-type: none"> • Norme de sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Capteurs de fin de course pour chaque axe • Arrêt d'urgence
Contrôler le mouvement	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse • Déplacement 	<ul style="list-style-type: none"> • Moteur pas à pas Nema23, Nema17 • Carte ARDUINO UNO, Mega 2650 • Driver TB6560, A4888
Alimenter le système	<ul style="list-style-type: none"> • Voltage • Puissance 	<ul style="list-style-type: none"> • Boîtes d'alimentation réglable - Input : 220V - Output : 12V-45V
Être agréable à l'œil	<ul style="list-style-type: none"> • Règles d'esthétique 	<ul style="list-style-type: none"> • Boîtier pour la partie électronique • Gaines pour les fils • Peinture appropriée
Montage et démontage d'outil	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre d'outil - Règles de montage d'outil 	<ul style="list-style-type: none"> -Broche -Diamètre min : 0.8mm -Moteur de la broche -Vitesse : 0-3000 tr/min -Input : 12V -25V
Fixation de la pièce	<ul style="list-style-type: none"> - Règles de serrage - Dimension de la pièce 	<ul style="list-style-type: none"> - Etau - 500X800X300mm
Economique	<ul style="list-style-type: none"> - Prix 	Moins de 500000Da

Tableau 5. Le CdCF de notre machine

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré l'analyse fonctionnelle de notre produit. On a d'abord réalisé l'analyse externe pour bien cerner le besoin. Par la suite, nous avons effectué l'analyse interne du produit pour appréhender son fonctionnement. Ceci nous a permis d'élaborer le cahier des charges de notre machine. Cela va nous permettre d'aborder la partie conception de notre machine d'une façon ordonnée.

Chapitre 3 :

**Conception et réalisation de la partie
Mécanique de machine**

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de décrire les étapes suivies lors de la conception de notre machine-outil à commande numérique (CNC) à 5 axes. Ce chapitre détaillera les processus de conception assistée par ordinateur (CAO), les solutions technologiques adoptées, ainsi que les calculs nécessaires pour dimensionner les différents éléments de la machine. Il vise à fournir une compréhension approfondie des aspects techniques et des choix technologiques impliqués dans le développement d'une machine CNC 5 axes.

D'une façon générale, on peut dire que la CAO joue un rôle crucial dans la conception des machines CNC en offrant une précision exceptionnelle dans la modélisation des composants et des assemblages. En effet, elle permet de concevoir avec une haute précision et de visualiser des modèles complexes en trois dimensions. En outre, elle facilite les simulations pour analyser le comportement des composants sous différentes conditions, permettant ainsi d'optimiser la conception avant la fabrication. Enfin, elle diminue les coûts et le temps de développement en réduisant les besoins de prototypes physiques et en permettant des modifications rapides.

Par ailleurs, l'architecture générale de la machine CNC 5 axes qu'on désire réaliser est composée de plusieurs composants clés, chacun ayant une fonction spécifique :

- **Broche** : Responsable de la rotation des outils de coupe.
- **Axes X, Y, Z** : Les axes linéaires principaux qui définissent le mouvement de la table ou de la broche.
- **Axes A, B** : Les axes de rotation supplémentaires qui permettent l'orientation de la pièce ou de l'outil.
- **Moteurs** : Fournissent le mouvement nécessaire aux différents axes.
- **Systèmes de Guidage** : Incluent les rails de guidage linéaires et les vis à billes pour assurer des mouvements précis.

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

- **Systèmes de Transmission** : Composés de vis à billes, courroies et pignons pour transmettre les mouvements des moteurs aux axes.

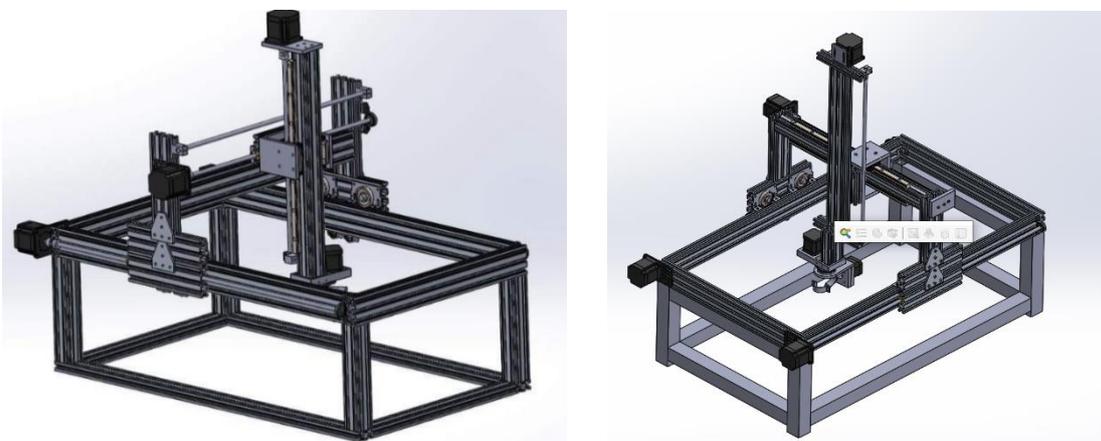
- **Contrôleurs CNC et Capteurs** : Gèrent les mouvements et fournissent un feedback pour assurer la précision des opérations.

I. Conception Assistée par ordinateur (CAO) de la machine :

Pour ce projet, nous avons choisi SolidWorks en raison de ses capacités de modélisation 3D avancées, de sa facilité d'utilisation, et de ses puissants outils de simulation. En effet, SolidWorks possède une interface intuitive avec de nombreuses fonctionnalités de simulation, ainsi qu'une grande communauté de support.

Durant l'étude des différentes solutions possibles et répondant aux exigences du cahier des charges, nous avons effectué différents assemblages représentant différentes alternatives. La figure 11 rassemble quelques solutions explorées.

Plusieurs facteurs ont affecté nos choix, en particulier les contraintes budgétaires. En effet, la conception devait se faire dans les limites des moyens disponibles. Pour faire face aux contraintes budgétaires, nous avons développé la CAO de la machine CNC 5 axes, axée sur la réduction des coûts tout en maintenant les fonctionnalités essentielles. Cette conception a été réalisée en utilisant des moyens de bord et en réalisant un prototype pour tester les solutions techniques. Les principes de conception retenus sont décrits dans la suite.



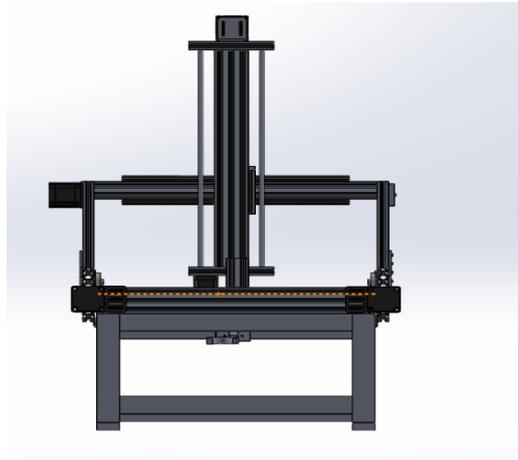


Figure 11. Exemples de modèles CAO de solutions étudiées pour répondre aux exigences du cahier de charges

II. Structure du bâti :

La structure du bâti de la machine est choisie parmi plusieurs alternatives : en porte à faux (cantilever), à colonne, à pont mobile, à pont fixe ou à portique. Nous avons opté pour la configuration à pont mobile car elle

- peut être utilisée pour de grandes portées avec un minimum de flèche comparées aux structures en porte-à-faux et colonnes.
- une plus grande zone de travail.
- Dans cette configuration, c'est le cadre qui se déplace, cela permet à l'axe des X d'être monté près du sol, ce qui est avantageux lorsque la masse du mécanisme de l'axe X est grande par rapport à la masse de la structure.

Cependant, ce type de structure est susceptible de lacet, dans lequel les deux pieds du pont se déplacent à vitesses différentes, entraînant une torsion du pont. En outre, on a une grande masse et un grand encombrement en déplacement selon l'axe X, ce qui constitue un inconvénient majeur de ces structures.

La figure 12 illustre la partie principale du bâti de notre machine. Pour le réaliser, nous avons opté pour des profilés en aluminium de sections 20x20 mm, 20x60 mm, et 40x40 mm. L'aluminium a été choisi en raison de sa combinaison idéale de légèreté et de rigidité. Ce matériau permet également une fabrication et une réalisation aisées de la machine, grâce à sa maniabilité et sa capacité à offrir

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

une stabilité remarquable. Ces caractéristiques sont cruciales pour garantir la précision et la qualité de la machine.

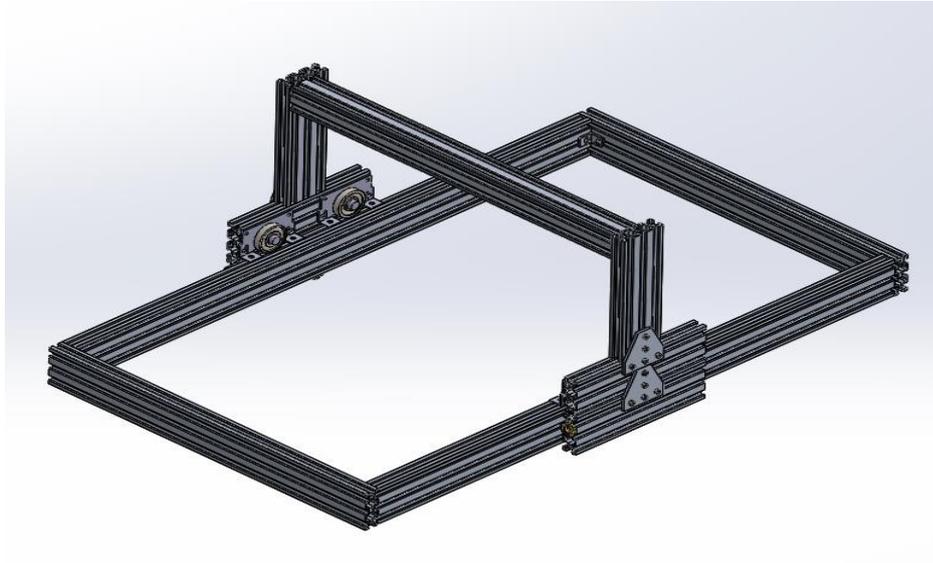


Figure 12 : Partie principale du bâti de la machine en aluminium de la machine CNC 5 axes

Pour l'assemblage des éléments en aluminium, nous avons utilisé des vis et des écrous (Figure 13). Cette méthode d'assemblage est choisie pour sa facilité de mise en œuvre et sa flexibilité, permettant des ajustements précis et une maintenance simplifiée. Les profilés en aluminium sont fixés solidement pour garantir une structure stable et rigide.

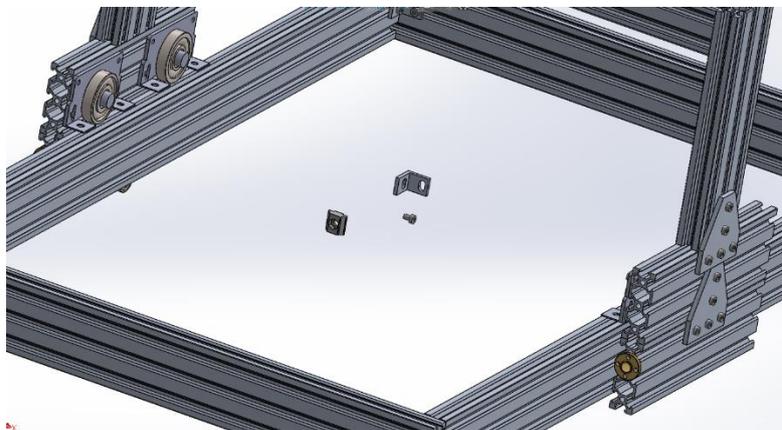


Figure 13 : Assemblage par vis et écrous de la structure en aluminium

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

Cette première partie du bâti est posée sur une autre Structure de support en acier (Fig 14). En effet, nous avons utilisé des tubes carrés en acier pour réduire les coûts tout en maintenant une excellente stabilité et rigidité de l'assemblage. L'acier, bien que plus lourd, offre une rigidité supérieure, ce qui est bénéfique pour les éléments structurels nécessitant une résistance accrue. Ce choix permet de concilier performance et économie, tout en assurant la robustesse de la machine.

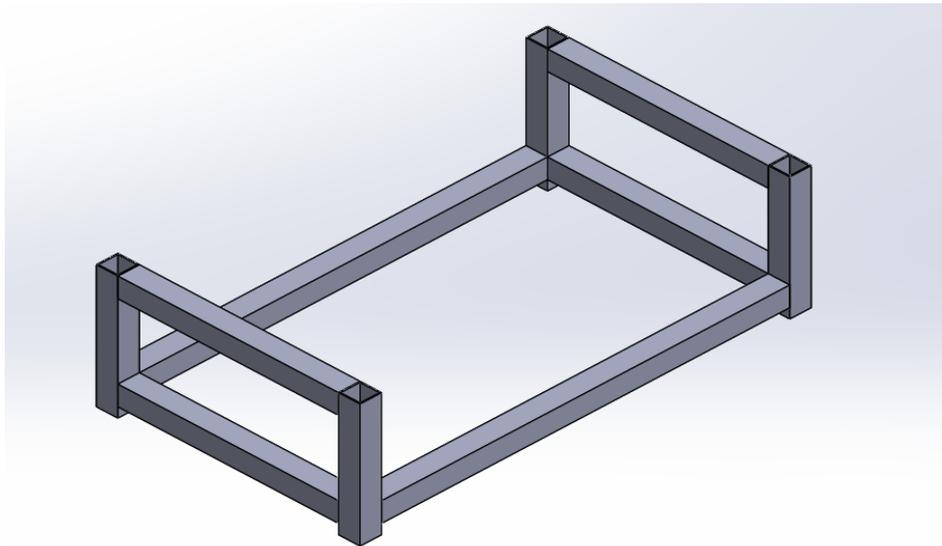


Figure 14: Structure de support en acier (tube carré) de la machine CNC 5 axes

Pour la structure en acier, nous avons opté pour le soudage, qui est la méthode d'assemblage la plus appropriée pour ce matériau. Le soudage offre une connexion solide et durable, essentielle pour les parties de la machine soumises à des contraintes mécaniques élevées. Cette technique assure que les éléments en acier sont bien intégrés, contribuant à la stabilité globale de la machine.

L'assemblage des deux parties (aluminium et acier) a été réalisé en utilisant des vis et des écrous comme l'illustre la figure 15. Cette combinaison permet de tirer parti des avantages des deux matériaux, en assurant une connexion robuste et stable entre les différentes parties de la machine.

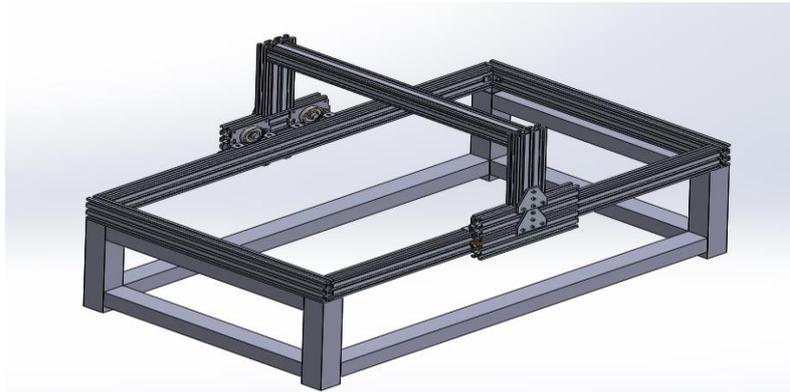


Figure 15. Assemblage de la structure du bâti de la machine CNC 5

III. Les actionneurs :

Essentiellement deux types d'actionneurs seront utilisés :

- Les moteurs pas à pas de type Nema 23 pour actionner les axes X Y Z
- Les moteurs pas à pas de type Nema 17 pour actionner les axes A B

Ces moteurs sont généralement fixés solidement au châssis à l'aide d'un support fabriqué en plastique de 6 mm d'épaisseur, produit par impression 3D ou découpé sur CNC comme illustré sur la figure 16.

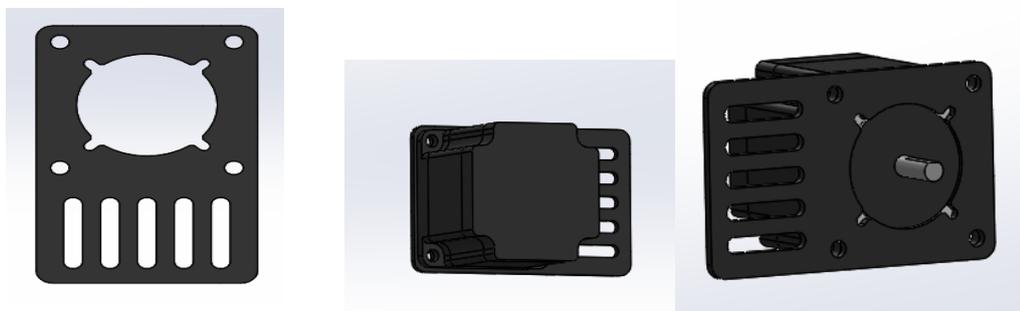


Figure 16 : Moteur NEMA 23 avec son support

Les Nema 23 utilisent des mécanismes de transformation rotation-translation à base de vis écrou. Le moteur est couplé à une tige filetée trapézoïdale de 528 mm de longueur et de 8 mm de diamètre à l'aide d'un coupleur 8x8mm. Ce coupleur assure une transmission de puissance efficace et un alignement précis entre le moteur et la tige. Cette solution est retenue pour les trois premiers axes de la machine (voir Fig. 17). Pour garantir un bon alignement de l'ensemble, nous avons fabriqué une pièce spéciale en Forex de 10 mm

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

d'épaisseur. Cette pièce, conçue à l'aide de la machine CNC, assurant un positionnement précis et stable de l'écrou trapézoïdal. L'écrou est intégré dans une autre pièce intermédiaire spéciale qui facilite le déplacement de l'axe linéaire.

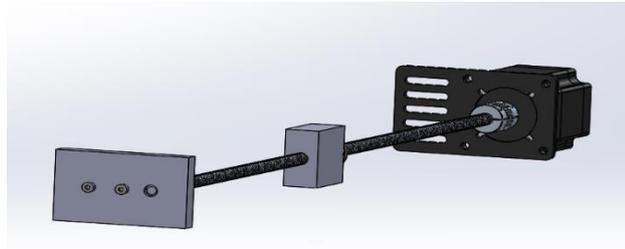


Figure 17. Système de transformation de mouvement des axes linéaires XYZ : Tige filetée trapézoïdale, écrou et supports d'axe linéaire

Il faut noter que le mouvement de translation sur l'axe Y est assuré par deux moteurs pas à pas NEMA 23, placés de chaque côté de l'axe. Chaque moteur est fixé dans un support fabriqué en Forex de 10 mm d'épaisseur, produit par la machine CNC. Les moteurs sont reliés à des tiges trapézoïdales par des coupleurs de 8x8 mm. Les tiges trapézoïdales passent à travers les trous des profils de 20x60 mm, et les écrous sont fixés sur ces dernier profilée .

IV. éléments de guidage et montage des axes :

Pour assurer la translation, on doit faire appel à des guidages linéaires. Cela peut se faire en utilisant des patins, des roues sur des rails en profilé, ou des roulements linéaires sur tiges lisses. Différentes combinaisons ont été testées.

Ainsi pour l'axe X, nous avons maintenu l'utilisation de guidages linéaires avec des patins pour assurer une précision accrue, et une tige trapézoïdale pour la transmission du mouvement. Cette configuration offrait une robustesse et une stabilité améliorées par rapport à la conception initiale.

En particulier, nous avons utilisé un système de guidage linéaire composé de rails et de patins. Le rail de guidage a une longueur de 400 mm et une épaisseur de 20mm. Ce rail est fixé à un profilé en aluminium de section 40x40 mm pour assurer une rigidité et un alignement parfaits. Les patins (fig 18), d'une

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

épaisseur de 20 mm, sont reliés au rail à l'aide de vis, disposées de manière parallèle pour garantir un mouvement linéaire fluide et précis.

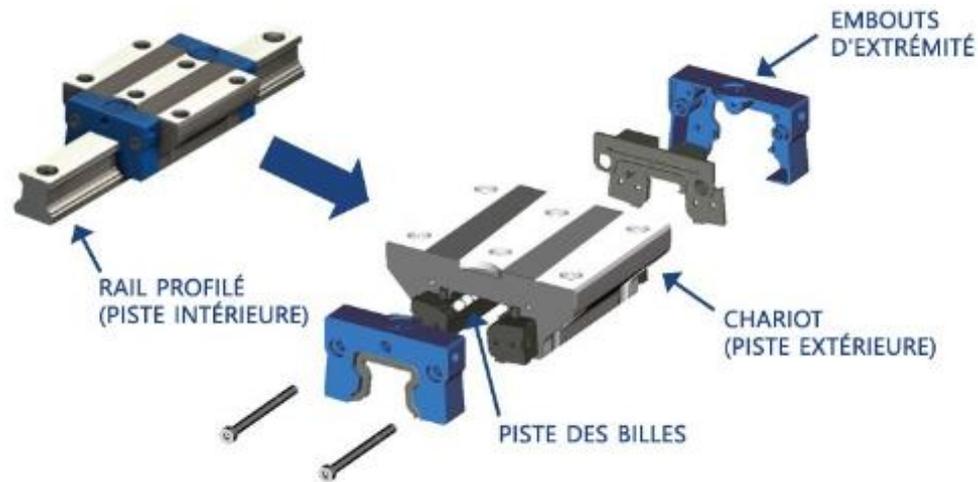


Figure 18 : Guidage linéaire composé de rails et de patins utilisé pour l'un des axes de notre machine

L'assemblage de l'axe X (fig 19) comprend l'intégration de tous les composants mentionnés précédemment : le rail de guidage, les patins, la tige filetée trapézoïdale, l'écrou, le moteur NEMA 23 et les pièces sur mesure. Cet assemblage garantit un mouvement fluide et précis de l'axe X, il est illustré par la figure suivante.

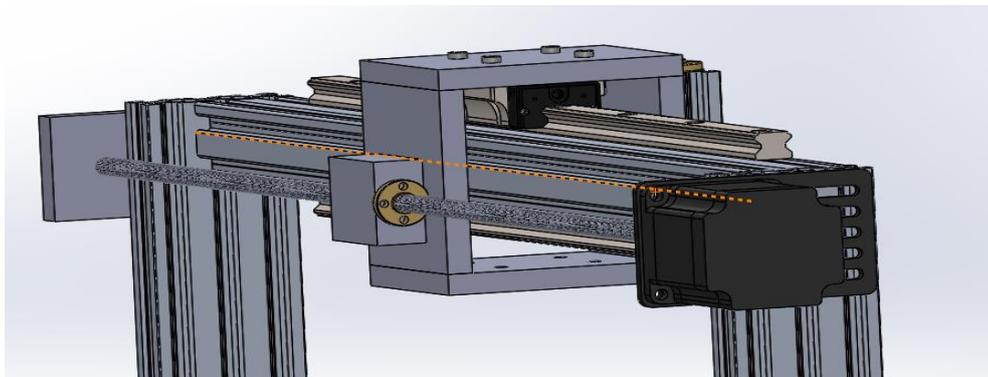


Figure 19: Assemblage complet de l'axe X de la machine CNC 5 axes.

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

Pour l'axe Y, nous avons utilisé des roues sur des rails en profilé 20x60 pour guider le mouvement de translation (Fig 20). Cette approche économique a été conservée pour garantir une translation fiable et précise, tout en maintenant les coûts bas. Les roues sont assemblées sur des chariots fabriqués à partir de deux profils de 20x60 mm, chacun de 200 mm de longueur, placés l'un sur l'autre. Les profils sont fixés ensemble à l'aide de liaisons solides pour assurer une structure stable et robuste.

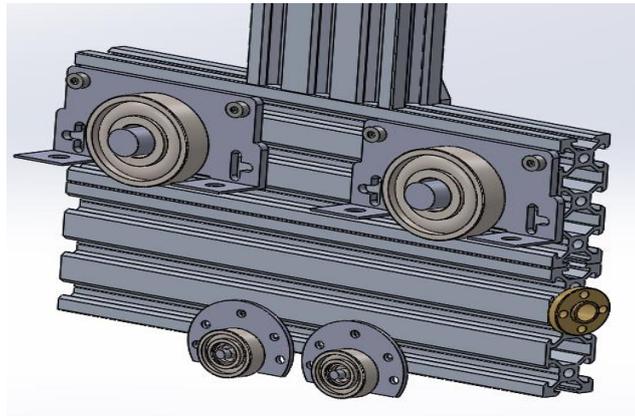


Figure 20: Système de guidage pour l'axe Y

L'assemblage de l'axe Y comprend l'intégration de tous les composants mentionnés précédemment (Fig 21): les rails de guidage, les roues, les tiges trapézoïdales, les écrous, les moteurs NEMA 23 et les supports en Forex. Cet assemblage garantit un mouvement fluide et précis de l'axe Y.

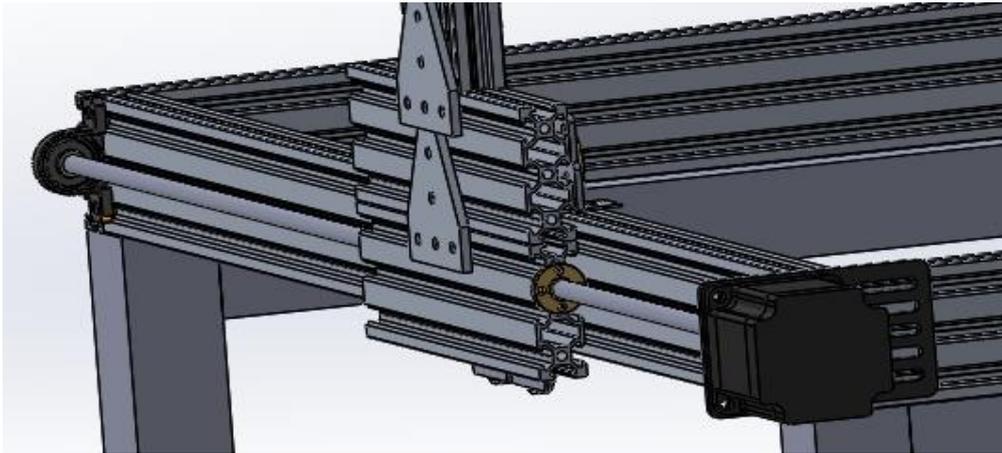


Figure 21 : Assemblage complet de l'axe Y de la machine CNC 5

Pour l'axe Z, nous avons adopté des tiges lisses et des roulements linéaires pour le guidage sur l'axe Z, et une tige trapézoïdale pour la transmission du mouvement. Pour garantir un mouvement fluide et précis de l'axe Z, on a utilisé des roulements linéaires sur tiges lisses en acier de 8 mm de diamètre. La structure de support de cet axe est un profilé en aluminium de section 20x60 mm de longueur de 500 mm. Cette combinaison a permis d'améliorer la précision et de réduire le poids sur l'axe Z, corrigeant les problèmes de désalignement et de stabilité rencontrés précédemment. Pour renforcer la stabilité et garantir un alignement correct de la structure principale, on a ajouté deux profilés en aluminium de section 20x20 mm aux extrémités du profilé principal. Ces supports sont fixés aux extrémités supérieure et inférieure du profilé principal. Les profilés 20x20 mm offrent une rigidité supplémentaire et servent de support pour d'autres composants, tels que les glissières linéaires. Ils permettent également de maintenir l'alignement de l'ensemble, ce qui est crucial pour la précision de l'usinage.



Figure 22 : Vue d'ensemble de l'axe Z

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

L'ensemble de l'axe Z est monté sur le système de guidage selon X via le dispositif de la figure 23. on a un écrou qui est monté dans un profilé aluminium de 20x60 mm de longueur 100 mm, relié à la structure principale. Ce profilé est fixé à une pièce en forex montée sur l'axe X, assurant ainsi une fixation stable et réduisant les vibrations.

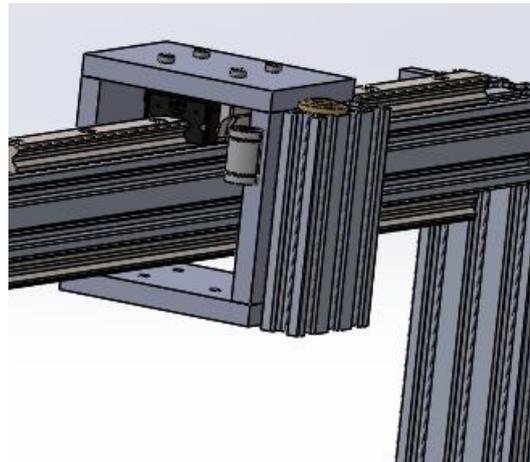


Figure 23 : Système de Montage de l'axe Z sur l'axe X

En ce qui concerne les Axes A et B qui sont des Systèmes d'axe rotatif, leur actionnement est assuré par deux moteurs pas à pas NEMA 17. La fixation du premier moteur est faite par le biais d'une pièce spécifique en plastique, fabriquée avec une imprimante 3D. Elle a été conçue initialement pour fixer solidement un moteur de axe A avec l'axe Z à l'aide d'un profilé en aluminium de section 40x40 mm (Fig 24).

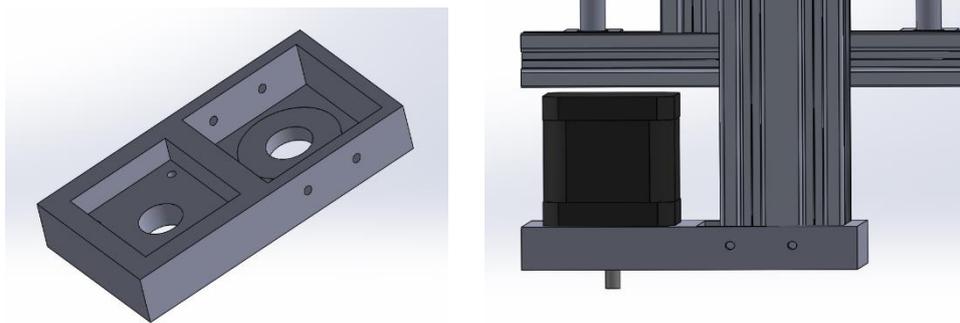


Figure 24 : Fixation de l'axe A et du 1^{er} moteur nema 17

Pour transmettre le mouvement rotatif du premier moteur NEMA 17, une poulie GT2 a été montée sur l'arbre de chaque moteur (Fig 25). Une courroie GT2 est utilisée pour assurer une transmission fluide et précise du mouvement à un pignon fabriqué avec une imprimante 3D. Pour garantir une rotation stable, un roulement de 8 mm a été intégré à la pièce principale, permettant à une tige lisse

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

de 8 mm de diamètre de pivoter librement. Aussi, la tige est équipée d'une gorge pour un circlip, ce qui assure une fixation sécurisée et empêche le mouvement axial. Le pignon, fabriqué en 3D, est fixé à l'extrémité de la tige avec un montage forcé, assurant une bonne transmission de la rotation. La fixation est maintenue grâce à un circlips pour garantir la stabilité et la précision du mouvement

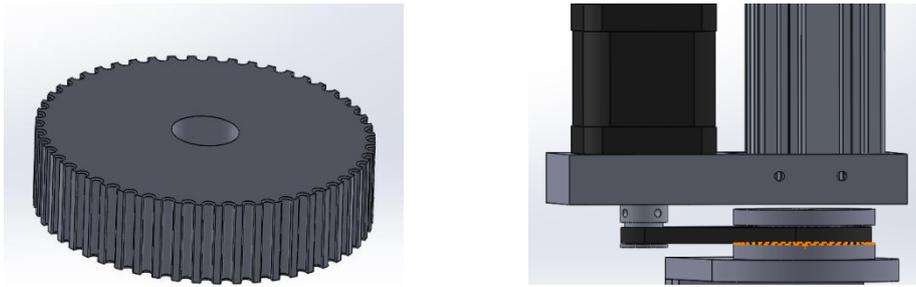


Figure 25 : Montage de la poulie GT2 et de la courroie pour la transmission du mouvement.

Pour fixer le deuxième moteur Nema 17 de l'axe B, on a adopté le montage de la figure 26 moyennant des pièces spécifiques en Forex qui ont été conçues pour fixer solidement le second moteur.

- Ces pièces assurent une fixation stable et un alignement précis de la tige de rotation, essentiel pour la précision des mouvements .

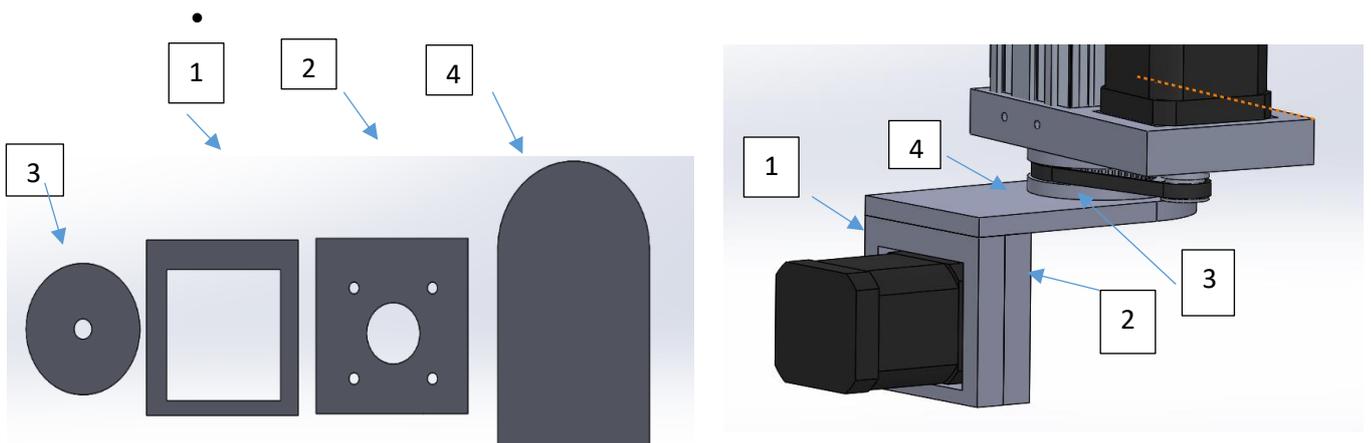


Figure 26 : Support en Forex pour la fixation du deuxième moteur NEMA 17 pour l'axe de rotation B.

V. Dispositif d'enlèvement de Matière : la broche :

Pour le système de broche de notre machine CNC, nous avons choisi d'utiliser une mini meuleuse de la marque Crown. Ce choix a été motivé par plusieurs facteurs clés, notamment la réduction des coûts, la minimisation du poids et la polyvalence de l'outil. En effet les broches spécifiques pour CNC peuvent être coûteuses, avec des prix variant largement en fonction des spécifications techniques telles que la puissance, la vitesse, et la précision.

En optant pour une mini meuleuse, nous avons pu réduire considérablement les coûts tout en conservant une performance adéquate pour les applications envisagées. La mini meuleuse Crown est disponible à un prix accessible, ce qui permet de maintenir le budget du projet à un niveau raisonnable sans compromettre la qualité de l'usinage.

Par ailleurs, on a une minimisation accrue du Poids. La mini meuleuse est un outil relativement léger par rapport aux broches traditionnelles, ce qui réduit la charge sur l'axe Z et améliore la maniabilité de la machine. Un poids réduit permet également de diminuer les contraintes mécaniques sur la structure de la machine, prolongeant ainsi sa durée de vie et améliorant la précision des mouvements. Ces mini meuleuses sont polyvalentes et largement disponibles, ce qui facilite leur remplacement ou leur mise à jour en cas de besoin. Aussi, la mini meuleuse Crown, en particulier, offre une gamme de vitesses et de puissances adaptées à diverses tâches d'usinage, ce qui la rend idéale pour des opérations allant de la découpe à la finition.

Pour la fixation de la Broche, on a conçu deux pièces supplémentaires, fabriquées en 3D, comme illustrée par la figure 27.

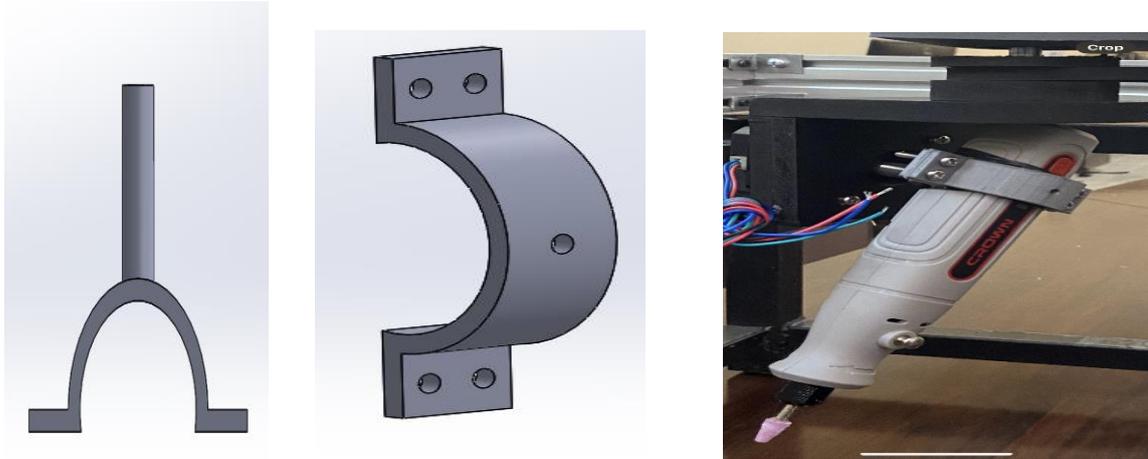


Figure 27 : Pièces imprimées en 3D pour la fixation de la mini meuleuse Crown

VI. Assemblage de la machine et réalisation :

La conception finale de notre machine est illustrée par la figure 28. Bien que simplifiée par rapport à l'idée initiale, elle représente un compromis réaliste entre performance, coût et faisabilité. Elle nous a permis d'aboutir à une machine CNC 5 axes fonctionnelle et adaptée aux ressources disponibles, en résolvant les défis techniques tout en respectant les contraintes budgétaires.

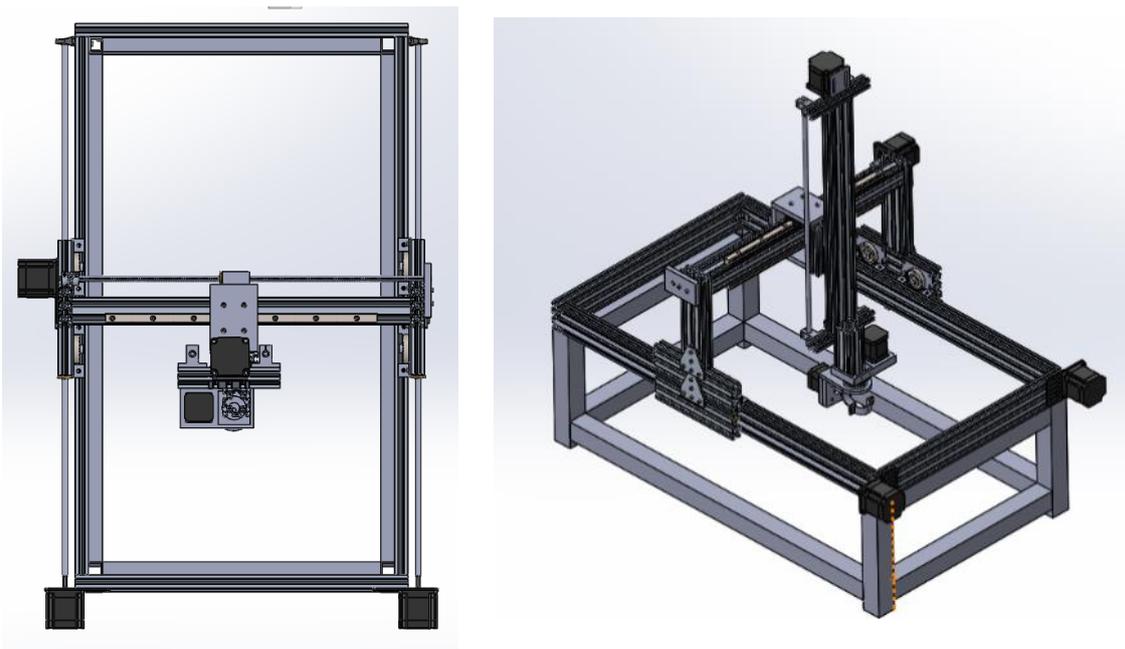


Figure 28 : Conception Finale retenue de la mini fraiseuse 5 axes CNC.

Chapitre 3 : Conception et réalisation de la partie Mécanique de machine

Les réalisations des différentes parties sont illustrées par les figures suivantes.

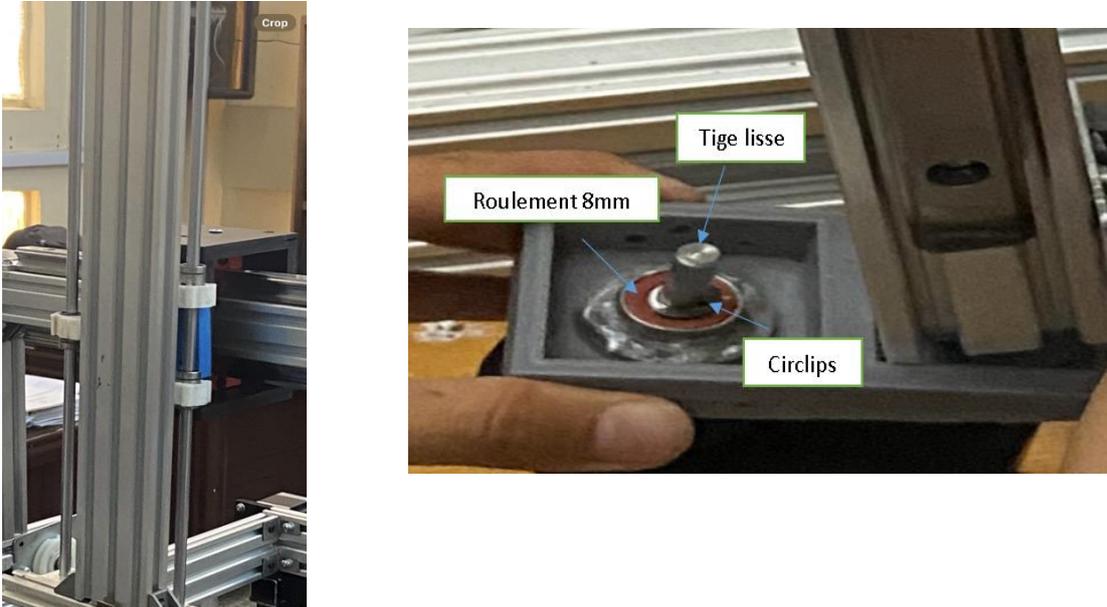


Figure 29. Réalisation de l'axe Z et de l'axe A

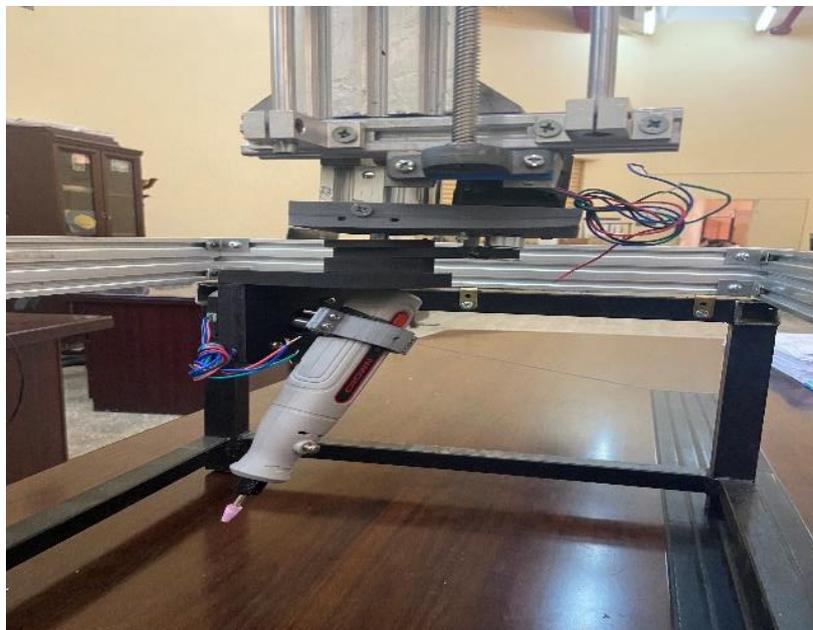
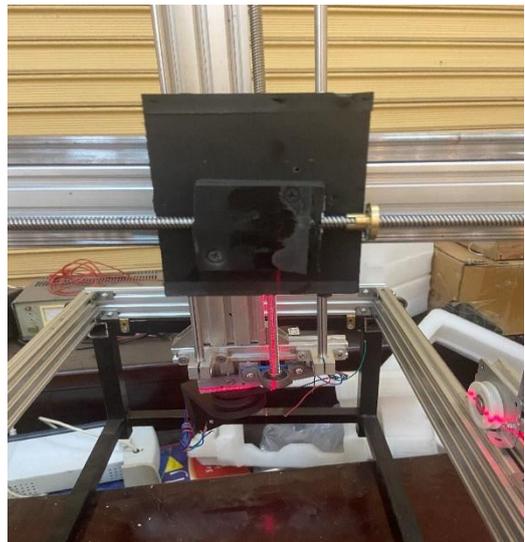


Fig. 30: réalisation des axes A et B et montage de la broche



Figure 31 : Assemblage complet de la machine

Des vérifications d'alignement et de perpendicularité durant le montage sont faites à l'aides les moyens disponibles au niveau du laboratoire comme le Laser (**Laser Tracker**) comme l'illustre les figures suivantes. Le laser tracker est un instrument de mesure de grande précision qui utilise un laser pour suivre la position d'un réflecteur et mesurer des distances et des angles dans un espace tridimensionnel. Il est utilisé pour aligner les composants critiques de la machine, comme les rails de guidage et les axes de rotation, en assurant une précision optimale des mouvements.



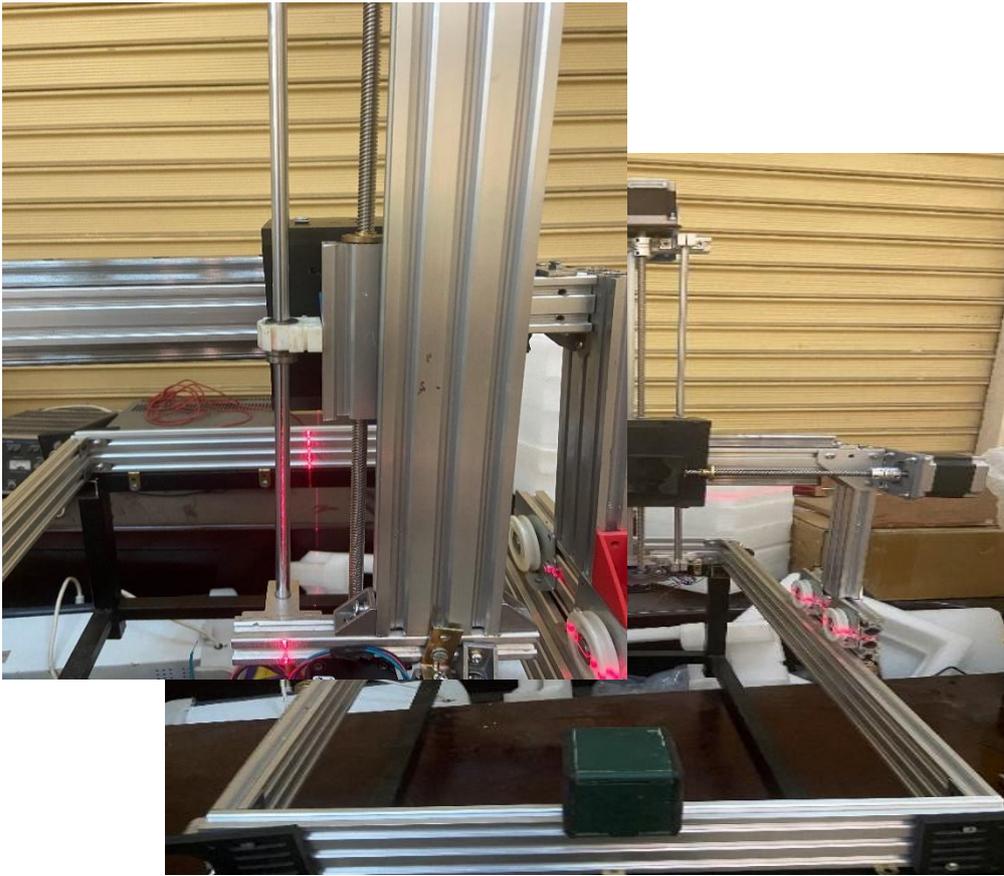


Figure 32 : vérification de l'Assemblage de la machine à l'aide du Laser Tracker

Conclusion

La CAO a été cruciale dans le développement de notre machine-outil à commande numérique 5 axes, en fournissant des outils puissants pour la conception et l'optimisation des composants. Elle a permis de réduire le temps et les coûts de développement tout en garantissant une précision et une qualité élevées. Grâce à la modélisation 3D, l'assemblage virtuel, la machine a pu être assemblée avec succès. Le prochain chapitre sera consacré au dimensionnement des principaux éléments de notre machines .

CHAPITRE 4 :

DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Introduction

La conception d'une machine CNC implique la sélection et le dimensionnement appropriés des composants pour assurer un fonctionnement précis, efficace et sûr. Les éléments clés comprennent le bâti, les moteurs, les entraînements et les systèmes de contrôle. Le processus de dimensionnement tient compte de facteurs tels que les exigences de charge, les spécifications d'exactitude et les conditions environnementales. Un dimensionnement adéquat des composants est crucial pour la durée de vie de la machine, la productivité et la sécurité.

En effet, le dimensionnement des composants est une étape importante dans le processus de conception d'une machine CNC. Il permet de déterminer les dimensions et les caractéristiques des différents éléments de la machine, en fonction des contraintes mécaniques, thermiques et dynamiques auxquelles ils seront soumis. Cette étape garantit que la machine sera capable de fonctionner de manière fiable et précise, en répondant aux exigences de performance spécifiées.

Le dimensionnement correct des composants permet également d'optimiser la consommation d'énergie, de minimiser les coûts de maintenance et de prolonger la durée de vie de la machine. En outre, il contribue à garantir la sécurité des opérateurs et des autres personnes travaillant à proximité de la machine.

I. Calcul des masses des éléments des différents axes

Pour assurer un dimensionnement précis de notre machine CNC 5 axes, il est essentiel de connaître la masse de chaque composant constituant les axes. Cela permet de calculer les charges appliquées, de choisir les moteurs adaptés et d'optimiser la conception globale. Les masses des composants ont été déterminées par différentes méthodes :

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

AXE X	
Composant	Masse (kg)
Suport moteur nema 23	0.01497
Vis trapezoidale +ecrou+ accouplement	0.119
Profilée aluminium 40x40	0.617
2 Rail de guidage lineaire	1.036
Patin du rail	0.237
Moteur nema 23	1.1
Les piece de fixation on forex	0.37
Profile de suppor de l'axe Z + ecrou	0.11
Les composant de l'axe Z	2.18
Les composant de l'axe AetB	2.21
	Totale = 7.95 kg

Tableau 6 : les masse de l'axe X

AXE Y	
Composant	Masse (kg)
2 Chariot de guidage	1.12
2(Vis trapezoidale +ecrou+ accouplement)	0.36
2 suport moteur nema 23	0.028
2 moteur nema 23	2.2
Profilé 20x60 pour rail de guidage	1.8
Les composant de l'axe X	7.95
	Totale = 13.45 kg

Tableau 7 : les masse de l'axe Y

Axe Z	
Composant	Masse (kg)
les profilées (20x20 / 20x60 /40x40)	0.84
Vis trapezoidale +ecrou+ accouplement	0.12
Tige de guidage lineaire	0.08
Moteur nema 23	1.1
Suport moteur	0.04
Les axe A et B	2.21
	Totale = 4.39 kg

Tableau 8 : les masse de l'axe Z

AXE A et B	
Composant	Masse (kg)
2 moteur nema 17	1.2
Les composant de fixation	0.194
La broche (mini meuleuse)	0.1
Les Roulement et tige	0.1
Couroi	0.001
	Totale = 1.59 kg

Tableau 9 : les masse de l'axe A et B

II. Calcul des Forces Axiales et des Couples :

Les forces axiales :

calculées à partir de la masse et de la gravité ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) $F=m.g$

- **Force Axiale Axe X F1** : $F_X=7,95 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2=77,99\text{N}$
- **Force Axiale Axe Y F2** : $F_Y=13,45 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2=131,85 \text{ N}$
- **Force Axiale Axe Z F3** : $F_Z=4,39 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2=43,05 \text{ N}$
- **Force Axiale Axe A et B** : $F_{A+B}=1.59 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2=15.64 \text{ N}$
- **Force Axiale axe A** = $0.73 \text{ kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 = 7.16 \text{ N}$ / **Force axiale**

axe B = $0.86 \text{ kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 = 8.43$

III. Dimensionnement de moteur et de vis trapezoidale de chaque axe :

Le dimensionnement d'une vis trapézoïdale implique de vérifier ses caractéristiques mécaniques pour garantir qu'elle puisse supporter les forces appliquées tout en minimisant l'usure et en maximisant l'efficacité. Pour une vis trapézoïdale de diamètre nominal de 8 mm et de pas de 2 mm, il est crucial de vérifier plusieurs paramètres, tels que les forces appliquées, les contraintes admissibles et les conditions d'usure.

IV. Paramètres Généraux

- Diamètre nominal (d) : 8 mm
- Pas (p) : 2 mm

Diamètre moyen (dm) : $\frac{d-h}{2}$ où h est la hauteur du filet

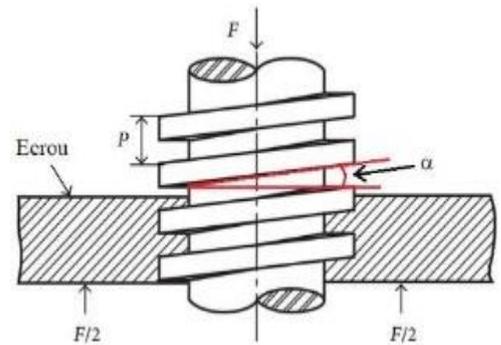


Figure 33: dessin d'une tige

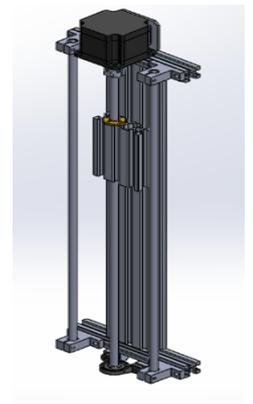
Pour choisir le moteur pas à pas, nous devons d'abord calculer le couple et la puissance nécessaire pour faire un déplacement selon l'axe Z.

A) Le Couple :

Le couple nécessaire pour le mouvement d'un système vis / écrou est calculée par la équationsuivante :

$$C = \frac{F \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 1000}$$

- C = couple (input) [N•m].
- F = force axiale sur l'écrou [N].
- P = pas de vis effectif [mm].
- η = efficacité (il faut considérer l'efficacité avec le coefficient de frottement de premierdétachement f= 0,23.



$$F = F1 + F2 + F3$$

B) La puissance :

La puissance nécessaire pour le déplacement d'un système vis/ écrou trapézoïdales estcalculée par l'équation suivante:

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550}$$

Avec :

$$F1 = \Sigma m_i \times g = 3.671 \times 9.81 = 36.01 \text{ N}$$

$$F2 = \Sigma m_j \cdot \gamma$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

γ : L'accélération, elle est donnée par

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

ΔV : La variation de la vitesse linéaire, on aura donc :

$$\Delta V = P \cdot n = \frac{2 \times 1000}{60} = 33,33 \text{ mm/s ou } 0,033 \text{ m/s}$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

On prend $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ qui est un temps de réponse assez court, on aura ainsi :

$$\gamma = \frac{33,33}{0,1} = 333,3 \text{ mm/s}^2 \text{ ou } 0,33 \text{ m/s}^2$$

Donc :

$$F_2 = 3,671 \times 0,6 = 2,20 \text{ N}$$

F_3 représente l'effort de pénétration F_p

$$F_3 = F_p$$

$$F_p = \frac{1}{3} F_c$$

$$F_c = K C \cdot a \cdot f$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Avec :

- F_c l'effort de coupe.
- f : Avance de l'outil par rotation de la broche en [mm/tr].

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

K_c : Coefficient spécifique de coupe dépend de la matière qu'on veut usiner et c'est en $[N/mm^2]$.

On prend $K_c = 800 N/mm^2$. (Aluminium)

- a : Profondeur de passe en [mm] dans notre cas $a = 1$.
- N : Vitesse de rotation de la broche en [tr/min]. On prend $N = 11000 tr/min$.

$$F = \frac{n \cdot p}{N} = \frac{1000 \cdot 2}{11000} = 0.181 \text{ mm/tr}$$

$$F_c = 800 \times 1 \times 0.181 = 144.8 \text{ N}$$

$$F_p = \frac{1}{3} \quad F_c = \frac{144.8}{3} = 48.266 \text{ N}$$

$$F_z = 48.266 \text{ N}$$

La force axiale totale F est : $F = F_1 + F_2 + F_3 = 36.01 + 2.20 + 48.266 = 86.476 \text{ N}$.

- Pression superficielle de contact P_s :

$$P_s = \frac{F}{A_t} = \frac{86.476}{180} = 0.48 \text{ Mpa}$$

- La vitesse de glissement V_{ST} :

$$V_{ST} = \frac{n \times P}{1000 \times \tan \alpha} = \frac{1000 \times 2}{1000 \times \tan 4.549^\circ} = 25.13 \text{ m/min}$$

- Le produit nous donne :

$$P_s \cdot V_{ST} \cdot f = 0.48 \times 25.13 \times 0.8 = 9.65 \text{ Mpa.m/min}$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Pour l'axe Z :

$$C_z = \frac{43.05 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Le couple :

$$C_{nz} = 0.05 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.09 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La puissance :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.09 \cdot 1000}{9550} = 9.42 \text{ Watt}$$

pour l'axe Z nous avons choisi un moteur nema 23 .

D) Pour l'axe Y :

Même méthode comme pour l'axe Z, mais cette fois on divise sur 4, car on a deux tigestrapézoïdales.

$$F = \frac{1}{4} (F_1 + F_2 + F_3)$$

On Remarque encore une différence de la masse des parties en mouvement avec :

$$F_1 = \Sigma m_i \times g = 27.38 \times 9.81 = 268.59 \text{ N}$$

La masse de F2 change

$$F_2 = \Sigma m_i \times \gamma = 27.38 \times 0.6 = 16.42 \text{ N}$$

F₃ dans ce cas représente l'effort de coupe donc aucun changement:

$$F_3 = F_c = a \cdot f = 800 \times 1 \times 0.181 = 144.8 \text{ N}$$

$$F = \frac{1}{4} (174.81 + 10.692 + 144.8) = 82.57 \text{ N}$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Donc, la force totale F égale à :

$$P_s = \frac{F}{A_t} = \frac{82.57}{180} = 0.46 \text{ MPa}$$

Pression superficielle de contact P :

La vitesse de glissement V_{ST} :

$$V_{ST} = \frac{n \times P}{1000 \times \tan \alpha} = \frac{1000 \times 2}{1000 \times \tan 4.549^\circ} = 25.13 \text{ m/min}$$

Le produit nous donne :

$$P_s \cdot V_{ST} \cdot f = 0.46 \times 25.13 \times 0.8 = 9.22 \text{ Mpa.m/min}$$

D'après ces calculs on conclure que il n'y a pas de risque d'usure pour la tige de l'axe Y .

calcul de couple nécessaire :

$$C_y = \frac{268.53 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.39 \text{ N.m}$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

La valeur de couple indiquée ne prend pas en compte l'efficacité des pièces mobiles associées à la vis, telles que les roulements, les courroies, ou autres composants. Lors de la conception, il est nécessaire d'ajouter une marge de sécurité de 20 à 30 % par rapport à la valeur technique estimée. Si des moteurs électriques avec un faible couple de démarrage sont utilisés, une augmentation supplémentaire de 50 % doit être envisagée pour atteindre le couple nominal requis.

$$C_{ny} = 0.39 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.76 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Calcul de puissance nécessaire :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.76 \cdot 1000}{9550} = 0.07 \text{ kW} = 70 \text{ Watt}$$

Nous avons choisi deux moteurs pas à pas nema 23 de puissance 50 w et couple de 1.2 N.m

E) Pour l'axe X :

$$F = \frac{1}{3} (F_1 + F_2 + F_3)$$

On Remarque également une différence de masse des parties en mouvement :

Avec : $F_1 = \Sigma m_i \times g = 7.188 \times 9.81 = 70.51 \text{ N}$

La masse de F_2 change aussi donc la force F_2 change aussi :

$$F_2 = \Sigma m_i \times \gamma = 7.188 \times 0.6 = 4.31 \text{ N}$$

F_3 dans ce cas représente l'effort de coupe au lieu de l'effort de pénétration :

$$F_3 = F_c = a \cdot f = 800 \times 1 \times 0.181 = 144.8 \text{ N}$$

Donc, la force totale F égale à :

$$F = \frac{1}{3} (70.51 + 4.31 + 144.8) = 73.20 \text{ N}$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.01 \cdot 1000}{9550} = 1.04 \text{ Watt}$$

- Pression superficielle de contact P :

$$P_s = \frac{F}{A_t} = \frac{73.2}{180} = 0.40 \text{ Mpa}$$

La vitesse de glissement V_{ST} :

$$V_{ST} = \frac{n \times P}{1000 \times \tan \alpha} = \frac{1000 \times 2}{1000 \times \tan 4.549^\circ} = 25.13 \text{ m/min}$$

Le produit (4) nous donne :

$$V_{ST} = \frac{n \times P}{1000 \times \tan \alpha} = \frac{1000 \times 2}{1000 \times \tan 4.549^\circ} = 25.13 \text{ m/min}$$

le couple

$$C_x = \frac{77.99 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.09 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C_{ny} = 0.09 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.17 \text{ N} \cdot \text{m}$$

la puissance :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.17 \cdot 1000}{9550} = 0.01 \text{ kW} = 17.80 \text{ Watt}$$

pour l'axe X nous avons choisi un moteur nema 23 de puissance 50 w et couple 1.2 N.m

F) les axe A et B :

axe A :

le couple :

$$C_a = \frac{7.16 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.009 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C_{na} = 0.009 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m}$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

la puissance :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.01 \cdot 1000}{9550} = 1.04 \text{ Watt}$$

axe B :
le couple :

$$C_b = \frac{8.43 \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot 1000} = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$C_{nb} = 0.01 \cdot 1.3 \cdot 1.5 = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La puissance :

$$P_t = \frac{C \cdot n}{9550} = \frac{0.01 \cdot 1000}{9550} = 1.04 \text{ Watt}$$

Pour les axes A et B nous avons choisi un moteur nema 17 pour chaque axe .

Calculs sur les roulements :

On dimensionne les roulements placés aux paliers des vis suivant deux critères :

- La capacité de charge dynamique. C'est-à-dire $C_{\text{roulement}} > C_{\text{nécessaire}}$.
- La durée de vie. C'est-à-dire $L_h_{\text{roulement}} > L_h_{\text{nécessaire}}$.

Pour cela on utilisera les formules suivantes :

$$L_h = \left(\frac{C}{P} \right)^k \cdot \frac{10^6}{60 \cdot N}$$

Où :

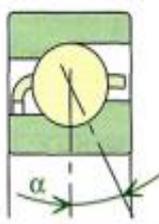
- f_Z : Coefficient supplémentaire des efforts dynamiques. On le prend $f_Z = 1$.
- f_H : Coefficient de dureté. On considère $f_H = 1$.
- f_t : Coefficient de température. Dans notre cas $f_t = 1$.
- f_L : Coefficient de durée de vie. On prend $L_h_{\text{nécessaire}} = 50000 \text{ h}$.

$$f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h_{\text{nécessaire}}}{500}} = 4.49$$

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

– f_n : Coefficient de nombre de tour

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{100}{3 \cdot n}} = 0.28$$

roulements à billes à contact oblique									
		roulements à une rangée et roulements en tandem (duplex T)				roulements à deux rangées et duplex en X et en O			
		si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$		si $\frac{F_a}{F_r} > e$		si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$		si $\frac{F_a}{F_r} > e$	
α degrés	e	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
20	0,57	1	0	0,43	1,00	1,0	1,09	0,70	1,63
25	0,68	1	0	0,41	0,87	1,0	0,92	0,67	1,41
30	0,80	1	0	0,39	0,76	1,0	0,78	0,63	1,24
35	0,95	1	0	0,37	0,66	1,0	0,66	0,60	1,07
40	1,14	1	0	0,35	0,57	1,0	0,55	0,57	0,93
45	1,33	1	0	0,33	0,50	1,0	0,47	0,51	0,81

* la valeur $\alpha = 40^\circ$ est la plus courante ; pour les angles $\alpha < 20^\circ$ les valeurs de e et y dépendent de $\frac{F_a}{C_0}$.

Figure36: les caractéristique des roulements a contact oblique

A) Calculs sur les roulements de l'axe Z :

Sachant que $P = 82.476 \text{ N}$, On aura donc : $C = 1244 \text{ N}$.

On choisit donc le roulement à billes 608zz avec $C_{\text{dyn}} = 3,39 \text{ KN}$. On vérifie maintenant la durée de vie pour le roulement choisi.

$$L_h \text{ roulement} = 986029 \text{ heures} \Rightarrow L_h \text{ roulement} \gg L_h \text{ nécessair}$$

B) Calculs sur les roulements de l'axe Y :

Sachant que $P = F/2 = 82.57 \text{ N}$. On aura donc : $C = 1197.2 \text{ N}$.

On choisit donc le roulement à billes 608zz avec $C_{\text{dyn}} = 3.39 \text{ KN}$ ^[13].

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

On vérifie maintenant la durée de vie pour le roulement choisi.

$Lh_{\text{roulement}} = 986029 \text{ heures} \Rightarrow Lh_{\text{roulement}} \gg Lh_{\text{nécessaire}}$

Remarque : On a divisé la charge supportée par le roulement par 2, car elle est répartie sur deux vis trapézoïdales.

C) Calculs sur les roulements de l'axe X :

Sachant que $P = F/3 = 71.20 \text{ N}$. On aura donc : $C = 1061.4 \text{ N}$.

On choisit donc le roulement à billes 608zz avec $C_{\text{dyn}} = 3.39 \text{ KN}$. On vérifie maintenant la durée de vie pour le roulement choisi.

$Lh_{\text{roulement}} = 1655444 \text{ heures} \Rightarrow Lh_{\text{roulement}} \gg Lh_{\text{nécessaire}}$

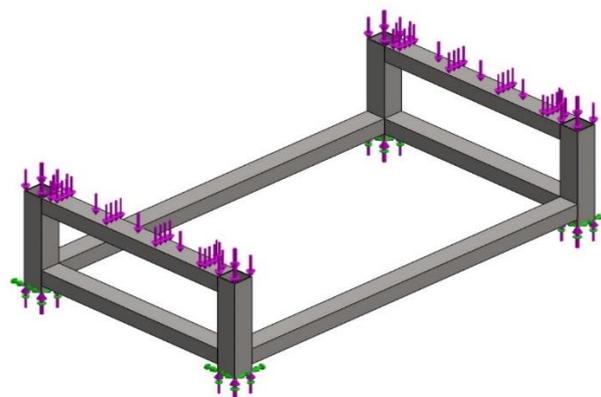
Remarque :

On a divisé la charge supportée par le roulement par trois car elle est répartie sur deux rails de guidage et une vis trapézoïdale

V. Dimensionnement de la structures :

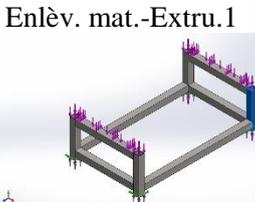
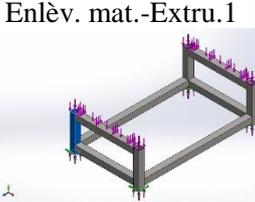
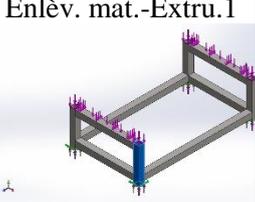
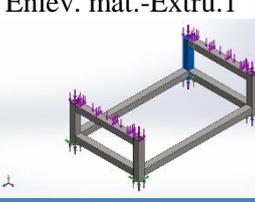
Avant de procéder à la simulation, il est crucial de définir avec précision plusieurs paramètres essentiels, notamment la force axiale. Ces paramètres jouent un rôle déterminant dans l'évaluation des performances de la structure de la machine CNC 5 axes et influencent directement les résultats de la simulation.

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

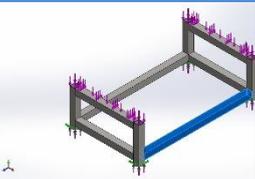
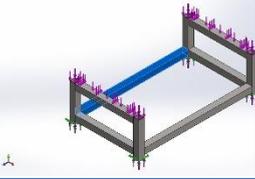
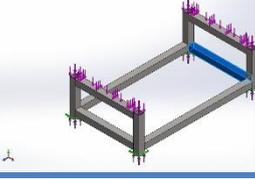
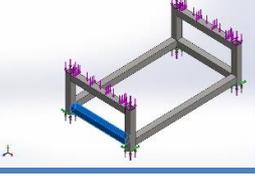
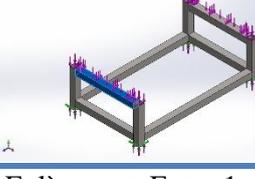
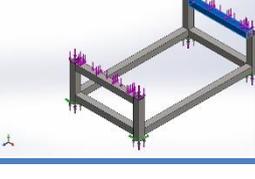


Nom du modèle: Assemblage2 Configuration actuelle: Défaut

Corps volumiques

Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques	Chemin/Date de modification du document
 Enlèv. mat.-Extru.1	Corps volumique	Masse:0,5928 kg Volume:7,6e-05 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:5,80944 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\PIECE 1 Z.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
 Enlèv. mat.-Extru.1	Corps volumique	Masse:0,5928 kg Volume:7,6e-05 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:5,80944 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\PIECE 1 Z.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
 Enlèv. mat.-Extru.1	Corps volumique	Masse:0,5928 kg Volume:7,6e-05 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:5,80944 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\PIECE 1 Z.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
 Enlèv. mat.-Extru.1	Corps volumique	Masse:0,5928 kg Volume:7,6e-05 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:5,80944 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\PIECE 1 Z.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1	Corps volumique	Masse:1,79929 kg Volume:0,000230678 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:17,633 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

			machine complet avec table\cnc chng\la table\piece 2 Y 758.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1 	Corps volumique	Masse:1,79929 kg Volume:0,000230678 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:17,633 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\piece 2 Y 758.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1 	Corps volumique	Masse:0,972832 kg Volume:0,000124722 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:9,53376 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\piece X 410.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1 	Corps volumique	Masse:0,972832 kg Volume:0,000124722 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:9,53376 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\piece X 410.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1 	Corps volumique	Masse:0,972832 kg Volume:0,000124722 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:9,53376 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\piece X 410.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024
Enlèv. mat.-Extru.1 	Corps volumique	Masse:0,972832 kg Volume:0,000124722 m ³ Masse volumique:7 800 kg/m ³ Poids:9,53376 N	C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table\piece X 410.SLDPRT Jun 19 14:09:32 2024

Propriétés de l'étude:

Nom d'étude	Statique 2
Type d'analyse	Statique
Type de maillage	Maillage volumique
Effets thermiques:	Activé(e)
Option thermique	Inclure des chargements thermiques
Température de déformation nulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SOLIDWORKS Flow Simulation	Désactivé(e)
Type de solveur	Automatique
Stress Stiffening:	Désactivé(e)
Faible raideur:	Désactivé(e)
Relaxation inertielle:	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Grand déplacement	Désactivé(e)
Vérifier les forces externes	Activé(e)
Friction	Désactivé(e)
Méthode adaptative:	Désactivé(e)
Dossier de résultats	Document SOLIDWORKS (C:\Users\PC CLICK Plus\Downloads\Assemblage CNC 5axe\cnc complet\cnc projet final\la machine complet avec table\cnc chng\la table)

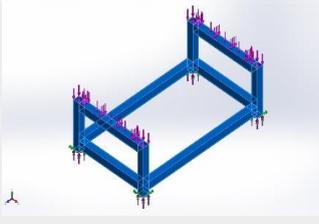
CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Unités:

Système d'unités:	SI (MKS)
Longueur/Déplacement	mm
Température	Kelvin
Vitesse angulaire	Rad/sec
Pression/Contrainte	N/m ²

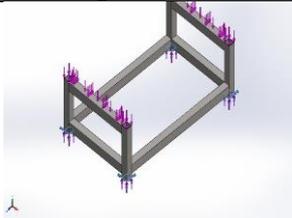
CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Propriétés du matériau:

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	<p>Nom: 1.0037 (S235JR)</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Inconnu</p> <p>Limite d'élasticité: $2,35e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Limite de traction: $3,6e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Module d'élasticité: $2,1e+11 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de Poisson: 0,28</p> <p>Masse volumique: $7\ 800 \text{ kg/m}^3$</p> <p>Module de cisaillement: $7,9e+10 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: $1,1e-05 \text{ /Kelvin}$</p>	<p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(PIECE 1 Z-2),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(PIECE 1 Z-3),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(PIECE 1 Z-4),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(PIECE 1 Z-5),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece 2 Y 758-1),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece 2 Y 758-2),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece X 410-2),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece X 410-3),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece X 410-4),</p> <p>Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(piece X 410-5)</p>
Données de la courbe:N/A		

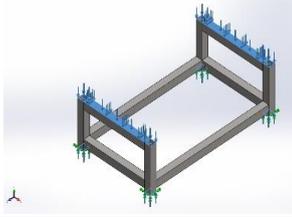
CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Actions extérieures:

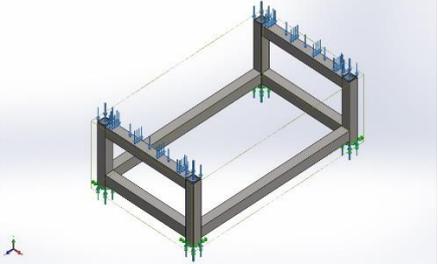
Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé
Fixe-1		Entités: 4 face(s) Type: Géométrie fixe

Forces résultantes :

Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	8,9407 e-06	549,12	2,8610 2e-06	549,12
Moment de réaction(N.m)	0	0	0	0

Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Force-1		Entités: 10 face(s) Type: Force normale Valeur: 274,56 N

Informations sur le contact:

Contact	Image du contact	Propriétés contact
Interaction globale		Type: Solidaire Composants: 1 composant(s) Options: Maillage indépendant

Informations sur le maillage:

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage standard
Transition automatique:	Désactivé(e)
Boucles automatiques de maillage:	Désactivé(e)
Points de Jacobien pour un maillage de qualité élevée	16 Points
Taille d'élément	22,5417 mm
Tolérance	1,12709 mm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec indépendamment	Désactivé(e)

Informations sur le maillage – Détails:

Nombre total de noeuds	19597
Nombre total d'éléments	9613
Aspect ratio maximum	94,927
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	0
Pourcentage d'éléments ayant un aspect ratio > 10	62,5
Pourcentage d'éléments distordus	0
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:00:04
Nom de l'ordinateur:	

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Forces résultantes:

Forces de réaction:

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	8,9407e-06	549,12	2,86102e-06	549,12

Moments de réaction:

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	0	0	0	0

Forces de corps libre:

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	3,57628e-05	5,45979e-05	-5,67436e-05	8,64855e-05

Moments externes:

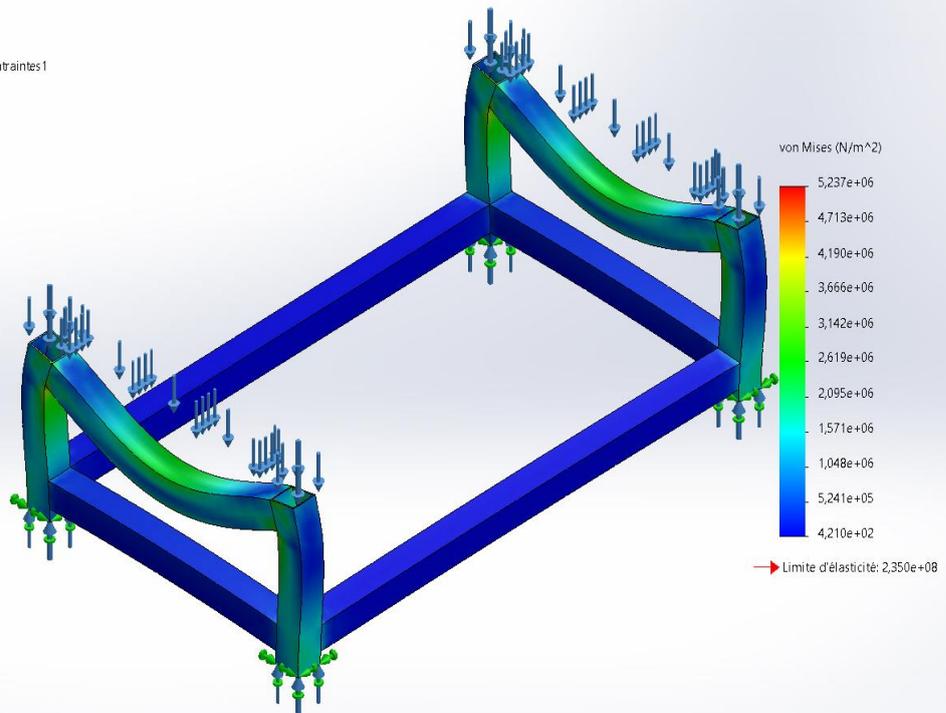
Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	0	0	0	1e-33

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE

Résultats de l'étude:

Nom	Type	Min	Max
Contraintes1	VON : contrainte de von Mises	4,210e+02N/m ² Noeud: 13860	5,237e+06N/m ² 2 Noeud: 15904

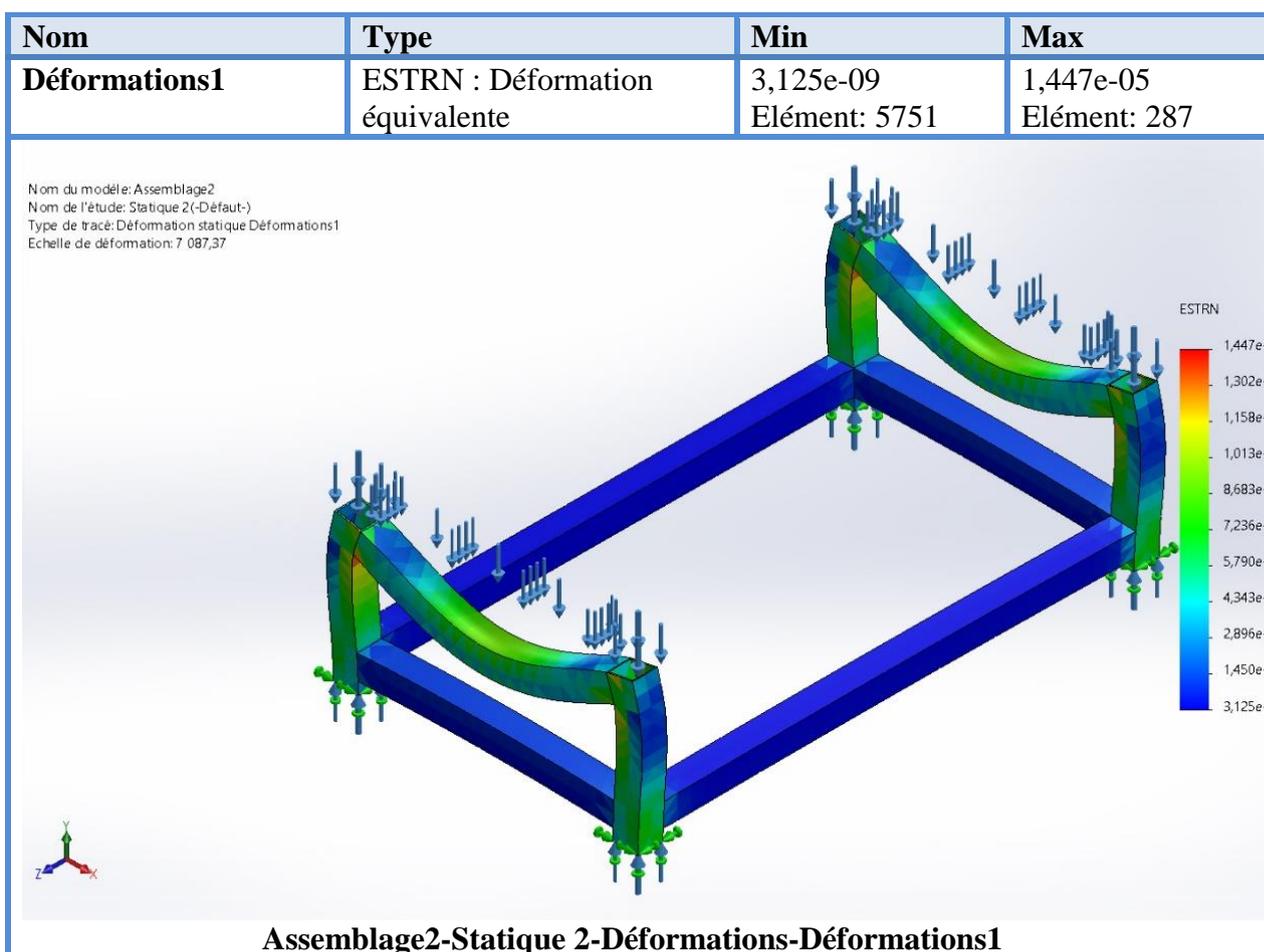
Nom du modèle: Assemblage2
 Nom de l'étude: Statique 2(-Défaut-)
 Type de tracé: Statique contrainte nodale Contraintes1
 Echelle de déformation: 7 087,37



Assemblage2-Statique 2-Contraintes-Contraintes1

Nom	Type	Min	Max
Déplacements1	URES : Déplacement résultant	0,000e+00mm Noeud: 16	1,185e-02mm Noeud: 16124

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE LA MACHINE



Conclusion :

La CAO a été cruciale dans le développement de notre machine-outil à commande numérique 5 axes, en fournissant des outils puissants pour la conception et l'optimisation des composants. Elle a permis de réduire le temps et les coûts de développement tout en garantissant une précision et une qualité élevées. Grâce à la modélisation 3D, l'assemblage virtuel et le dimensionnement précis, la machine dépasse les attentes en termes de performance et de durabilité. Cette approche méthodique et technologique a non seulement facilité la conception, mais a également établi des normes pour les futurs développements. En somme, la CAO a démontré l'importance de la précision, de l'efficacité et de l'innovation dans la fabrication de machines-outils, ouvrant la voie à de futures améliorations et innovations.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons exploré en profondeur la problématique du développement d'une machine-outil à commande numérique (CNC) 5 axes. Ce projet ambitieux s'est articulé autour de trois chapitres principaux : une introduction détaillée aux principes et aux avancées technologiques des machines CNC 5 axes, une analyse fonctionnelle exhaustive des exigences et des spécifications techniques, et une conception minutieuse de la machine elle-même.

L'étude des généralités sur les machines CNC 5 axes nous a permis de comprendre l'évolution de cette technologie et son rôle crucial dans l'amélioration de la précision, de la flexibilité et de l'efficacité des processus de fabrication modernes. Nous avons identifié les avantages clés de ces machines, notamment leur capacité à usiner des géométries complexes en une seule configuration, réduisant ainsi les temps de cycle et les coûts de production. Cette compréhension approfondie a jeté les bases pour la phase suivante de notre travail.

L'analyse fonctionnelle a détaillé les besoins industriels auxquels notre machine devait répondre, notamment en termes de performance, de fiabilité et de précision. Nous avons identifié les spécifications techniques cruciales, telles que les tolérances de fabrication, les forces de coupe, et les exigences en matière de contrôle numérique. Cette phase a été essentielle pour s'assurer que notre conception répondait aux standards industriels élevés et était capable de surmonter les défis techniques associés à la fabrication de pièces complexes.

La phase de conception a été marquée par le développement et l'intégration de systèmes de contrôle avancés, de moteurs de précision et de composants mécaniques robustes. Nous avons mis en œuvre des choix technologiques judicieux, validés par la réalisation de la machine, qui ont permis d'atteindre les objectifs fixés en termes de précision, de fiabilité et de performance. Cette réalisation a fourni des données précieuses pour évaluer l'efficacité des solutions choisies et identifier les domaines nécessitant des améliorations futures.

Notre travail s'inscrit dans une dynamique de progrès technologique et d'innovation industrielle. La machine CNC 5 axes que nous avons développée

Conclusion générale

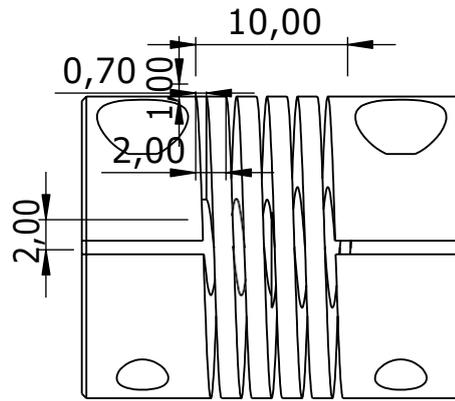
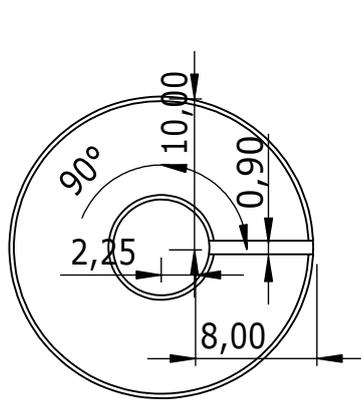
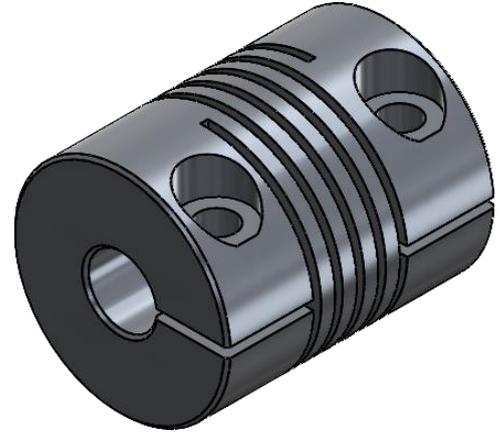
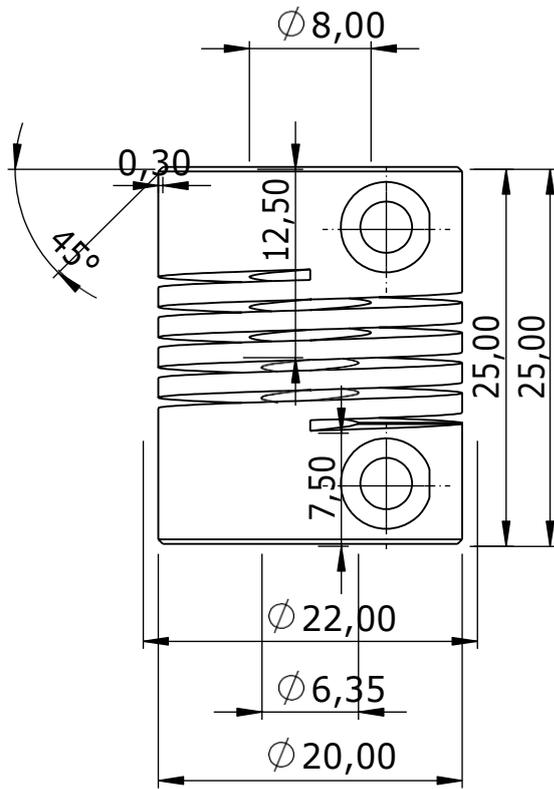
apporte des avantages significatifs, notamment une plus grande flexibilité dans la fabrication de pièces complexes, une précision accrue et une efficacité améliorée. Ces atouts sont cruciaux pour répondre aux exigences de secteurs industriels en constante évolution.

Pour aller plus loin, nous recommandons de continuer les recherches sur l'optimisation des algorithmes de commande pour améliorer encore la précision et la réactivité de la machine. L'intégration de technologies émergentes, telles que l'intelligence artificielle et l'Internet des objets, pourrait également offrir des possibilités d'amélioration continue et de maintenance prédictive, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle génération de machines CNC plus intelligentes et plus autonomes. De plus, des tests approfondis en conditions réelles d'utilisation seraient bénéfiques pour valider les performances de la machine dans des environnements industriels variés et pour affiner davantage ses capacités.

En conclusion, ce mémoire apporte une réponse substantielle à la problématique posée et ouvre des perspectives prometteuses pour des avancées futures dans le domaine de la fabrication assistée par ordinateur. Les résultats obtenus confirment la pertinence et le potentiel des machines CNC 5 axes pour transformer les processus de production modernes, offrant une flexibilité et une précision sans précédent dans la fabrication de pièces complexes.



ANNEXE



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

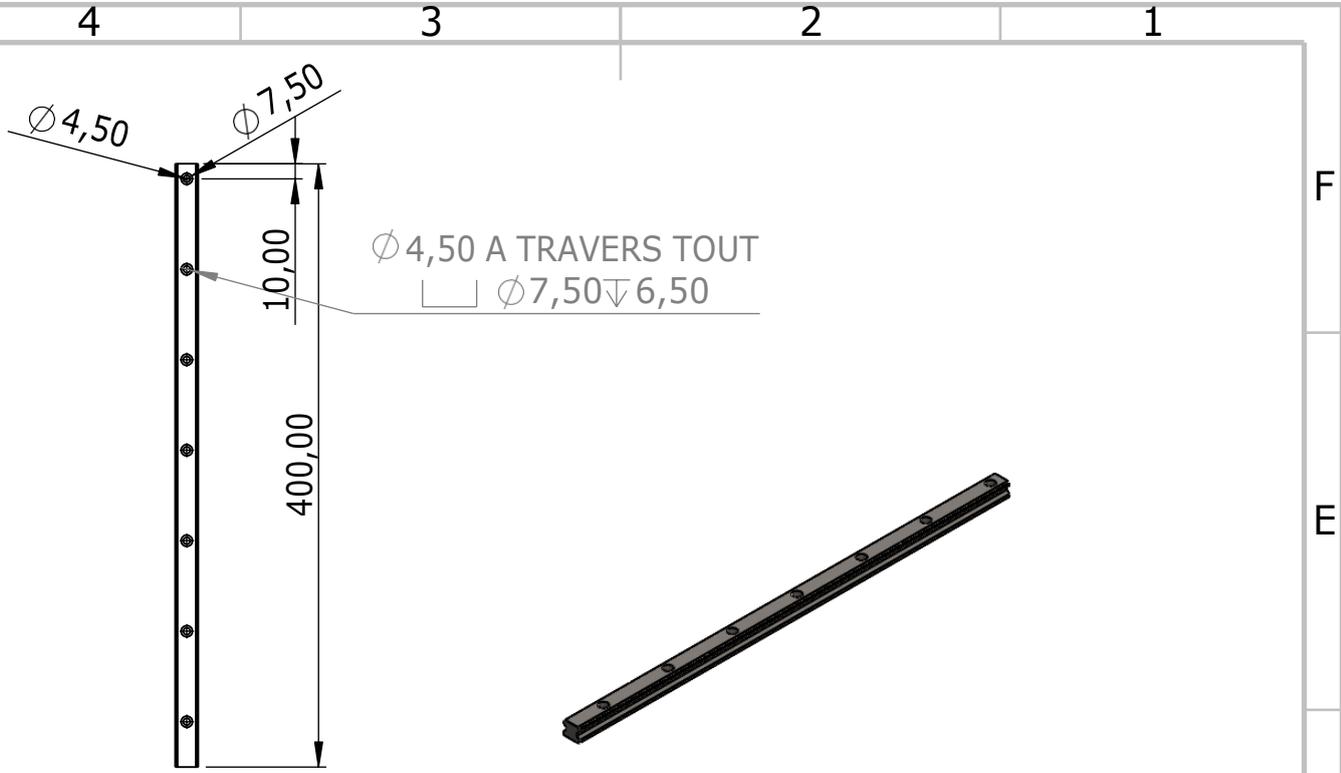
CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR		
VERIF.		
APPR.		
FAB.		
QUAL.		
MATERIAU:		
MASSE:		

TITRE:
No. DE PLAN
Flexible Coupling
0.25in x 8mm
A4
ECHELLE:2:1
FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

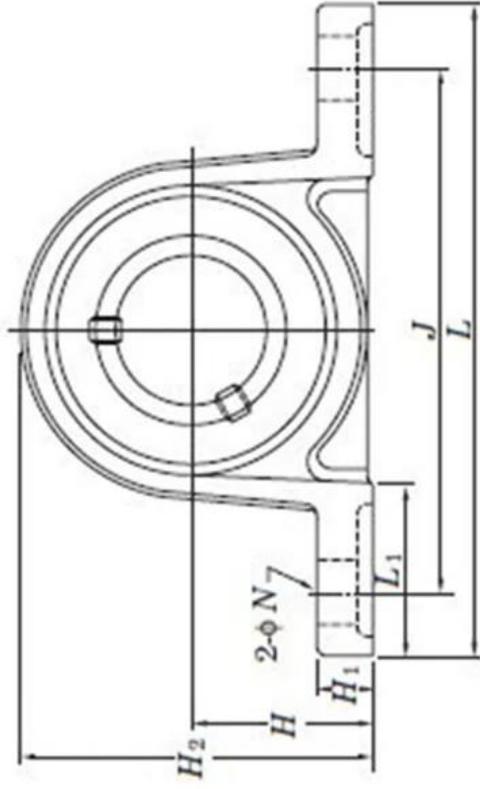
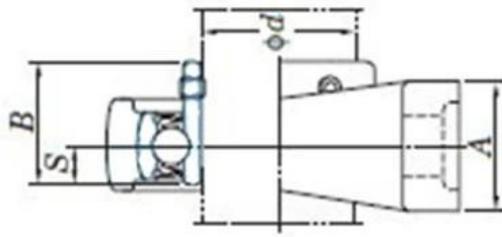
NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR					
VERIF.					
APPR.					
FAB.					
QUAL.					
				MATERIAU:	
				MASSE:	

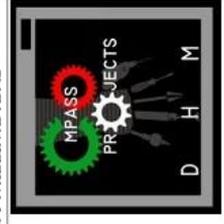
TITRE:	
No. DE PLAN	
Echelle: 1:5	
FEUILLE 1 SUR 1	

A4



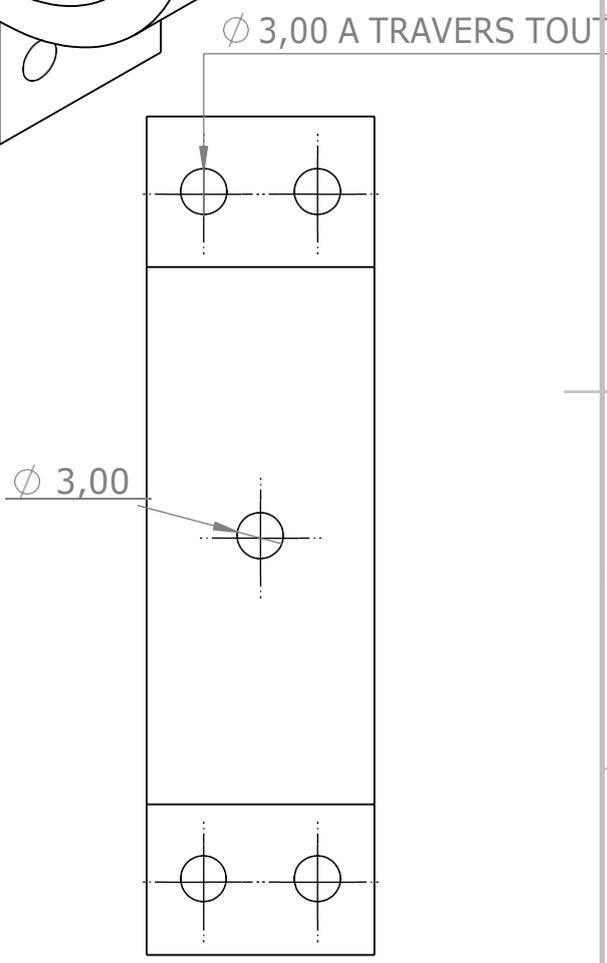
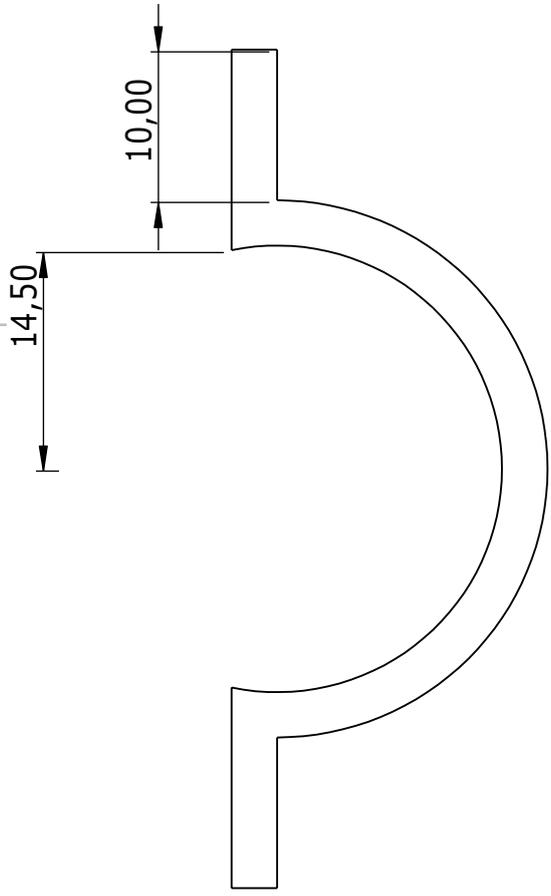
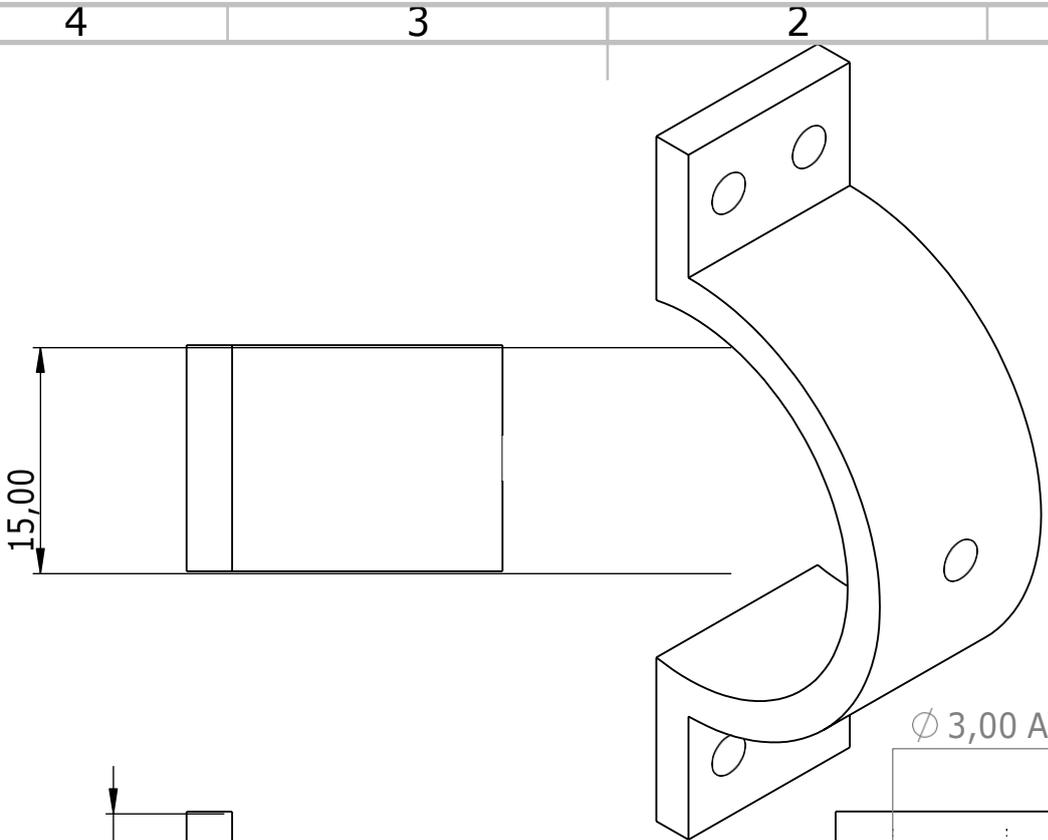
Model No.	Housing No.	Bearing No.	Mass (g)	Dimensions (mm)										Bolt size (mm)
				H	L	A	J	N	H1	H2	L1	B	S	
KP08	P08	K08	37	16	55	12	42	4.5	5	30	16	12	3	M5

IF NOT DEFINED QUOTE IN MILLIMETERS



Rev.	Data	Descrizione	Tipo macchina
00	12/06/2016	EMISSIONE	--
			CUSCINETTO AUTOALLINEANTE OVALE Ø INTERNO 8 MM
			Corpo cuscinetto: acciaio cromato
			--
			Disegnato
			Verificato
			SC
			MC
			COD. KP08

Il presente disegno è di proprietà della Compass DHM projects - È vietata la riproduzione o la cessione a terzi non autorizzata



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR				
VERIF.				
APPR.				
FAB.				
QUAL.				
			MATERIAU:	
			MASSE:	

TITRE:	
No. DE PLAN	
porte outil 2	A4
ECHELLE:2:1	FEUILLE 1 SUR 1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

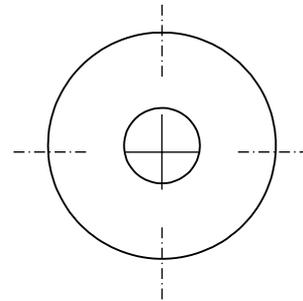
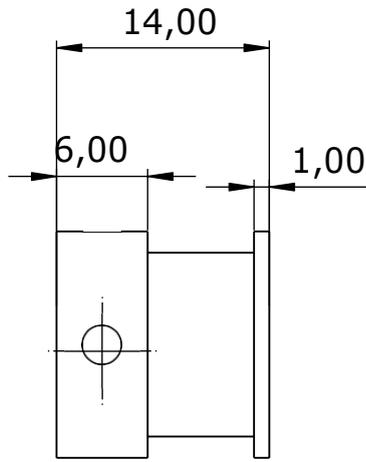
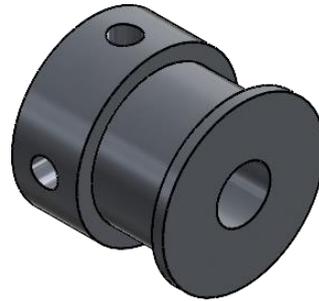
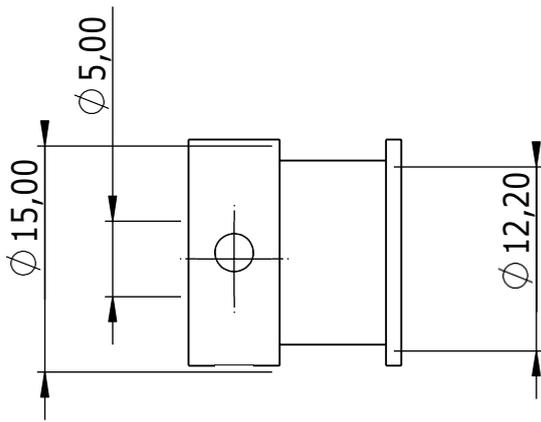
D

C

C

B

B



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

None

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

TITRE:

GT2 profile, 2mm pitch. For
6mm belt width. Two M3 se
screws included.

No. DE PLAN

GT2 Timing Pulley 20
Tooth

A4

MATERIAU:

Aluminum

MASSE:

ECHELLE:2:1

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

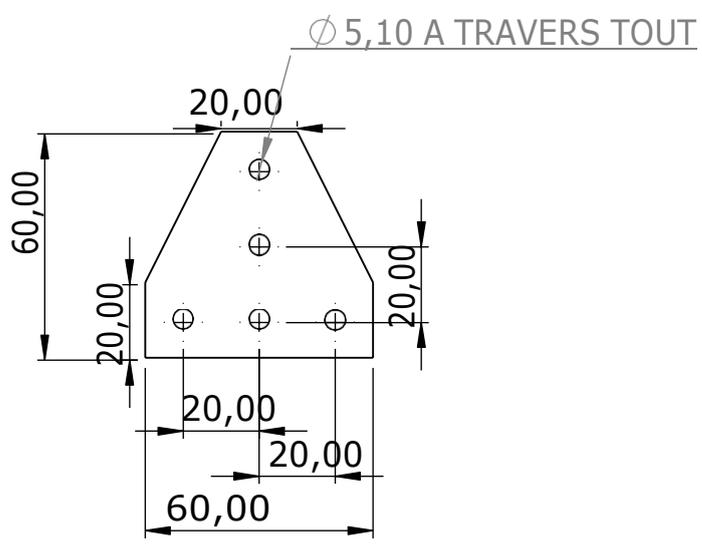
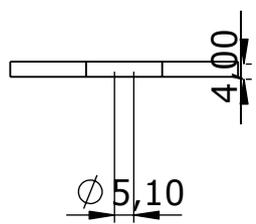
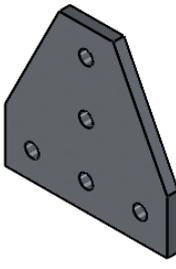
D

C

C

B

B



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:	CASSER LES ANGES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR		
VERIF.		
APPR.		

TITRE:	
No. DE PLAN	A4

FAB.		MATERIAU:	Aluminum	<h1>Joining Plate T</h1>
QUAL.		MASSE:		
			ECHELLE: 1:2	FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

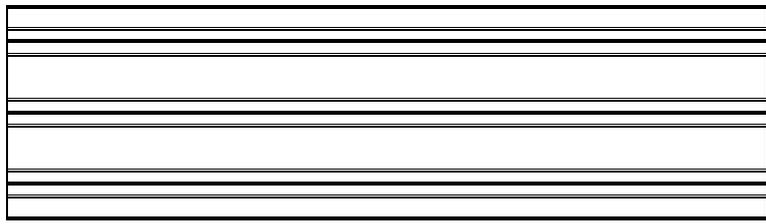
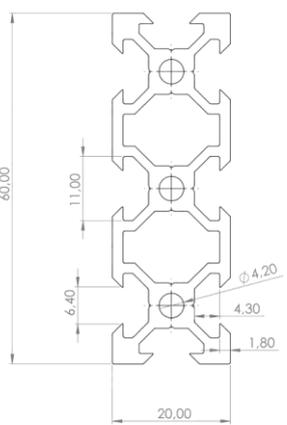
C

B

B

A

A



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR					
VERIF.					
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:	
No. DE PLAN	V-Slot 20x60x200 Linear Rail v
MATERIAU:	Aluminum
ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1
	A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

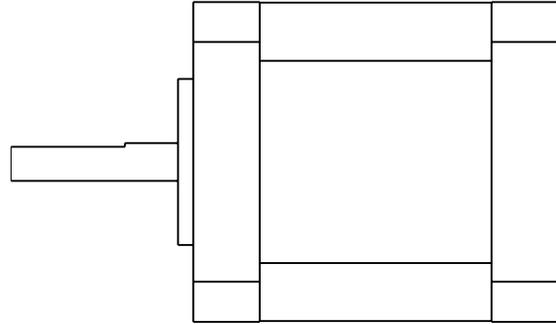
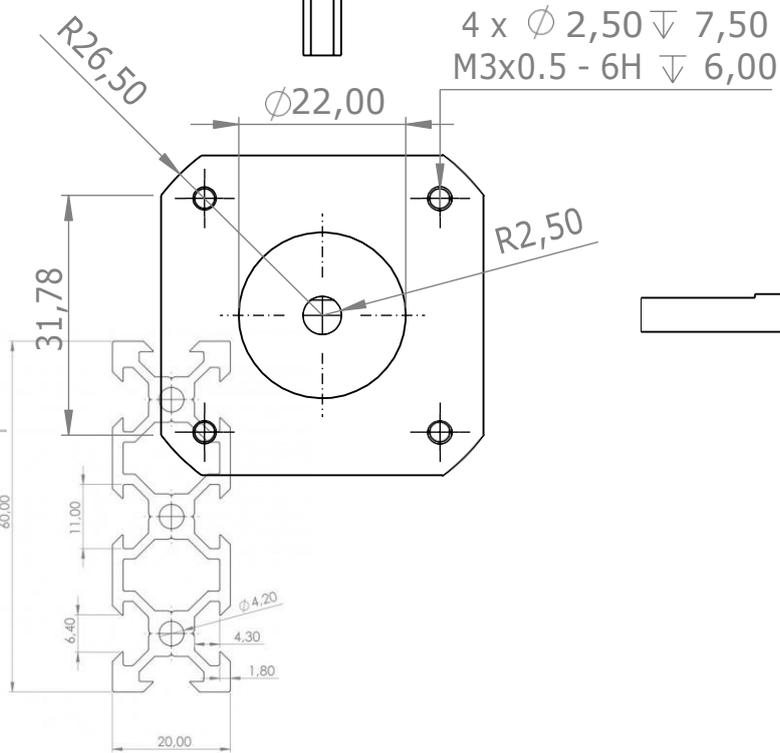
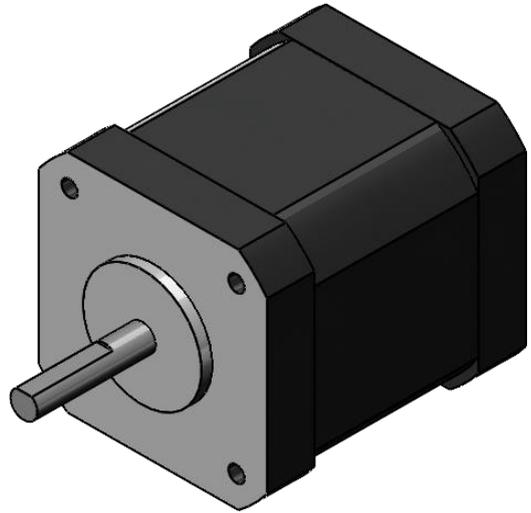
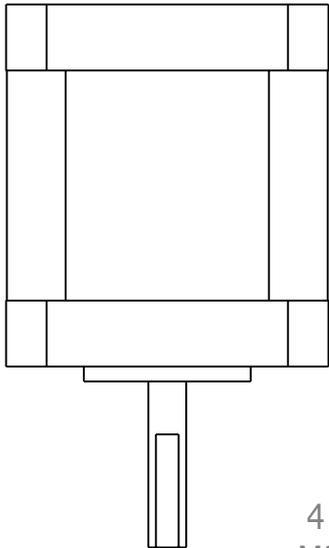
C

B

B

A

A



4 x ϕ 2,50 ∇ 7,50
M3x0.5 - 6H ∇ 6,00

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

TITRE:
Nema 17 Stepper Motor

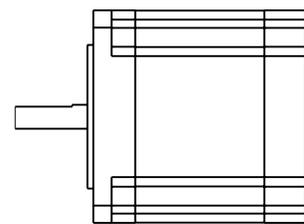
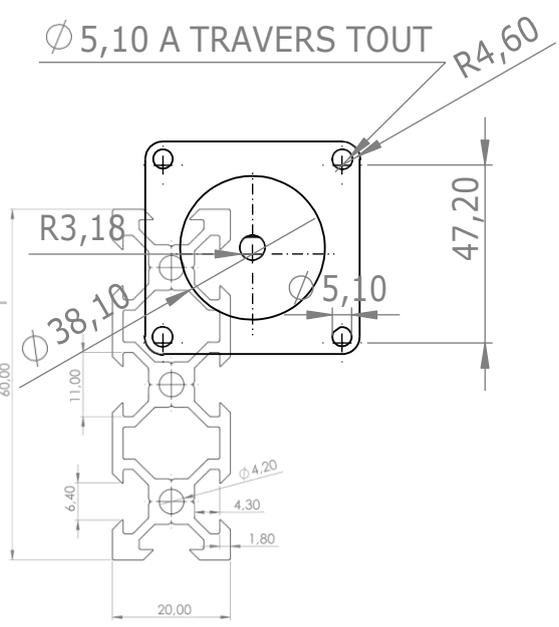
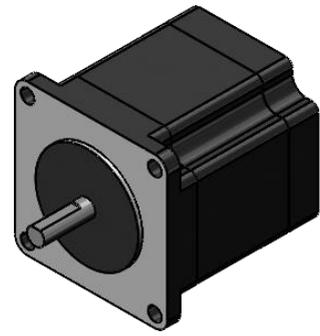
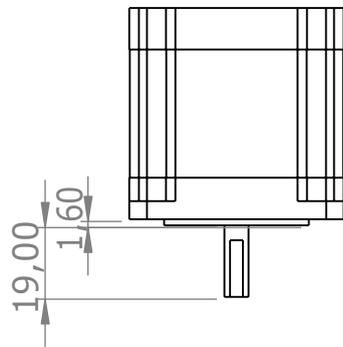
No. DE PLAN
Nema 17 Stepper Motor

ECHELLE: 1:1

FEUILLE 1 SUR 1

A4

4 3 2 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

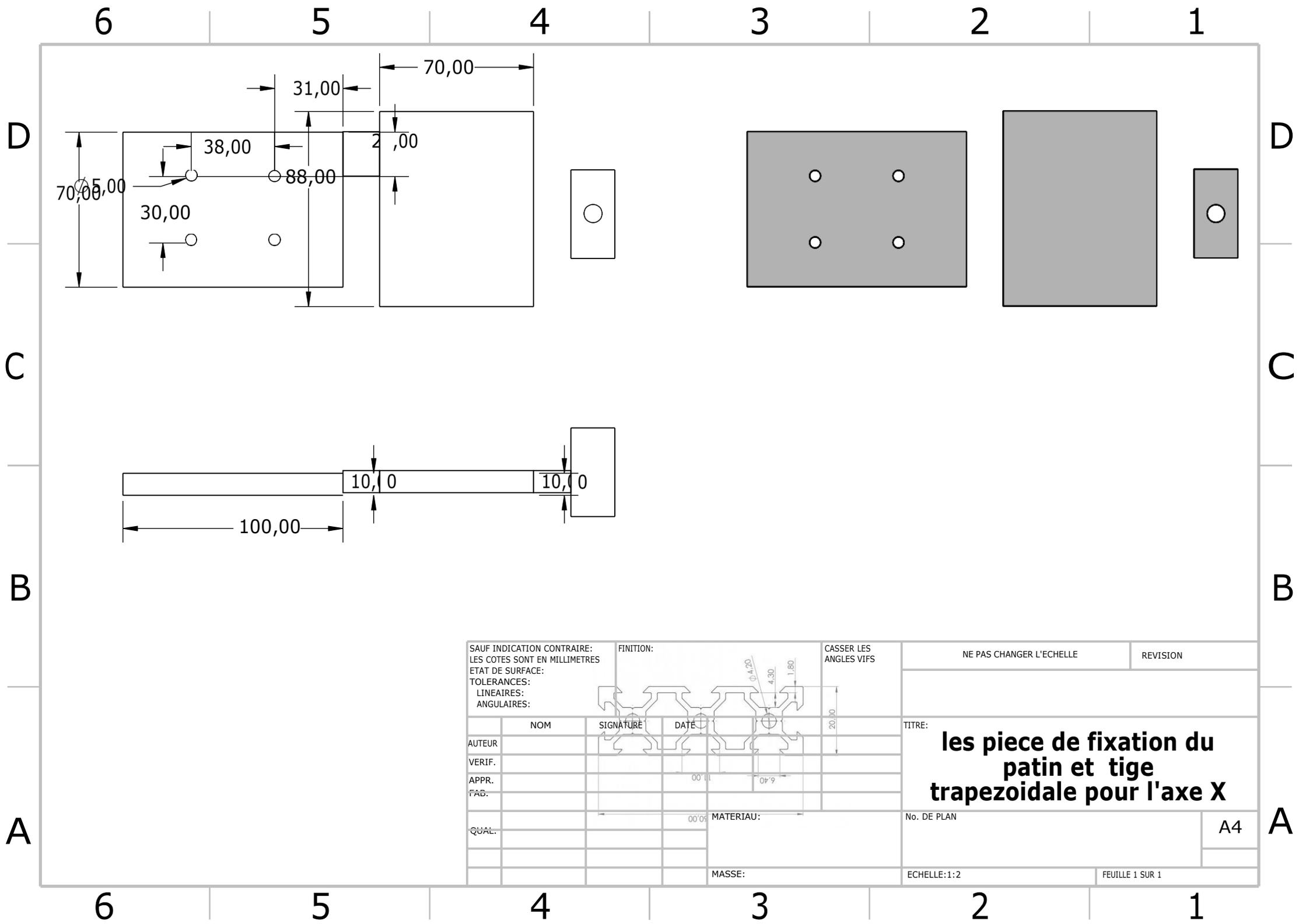
NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR		
VERIF.		
APPR.		
FAB.		
QUAL.		

TITRE:
Nema 23 Stepper motor

NO. DE PLAN:
Nema 23 Stepper Motor

ECHELLE: 1:2

FEUILLE 1 SUR 1



6 5 4 3 2 1

D

C

B

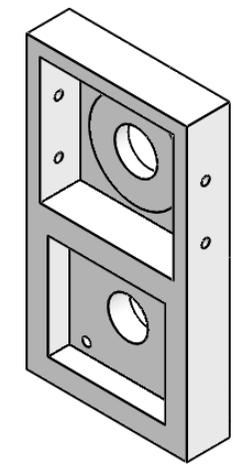
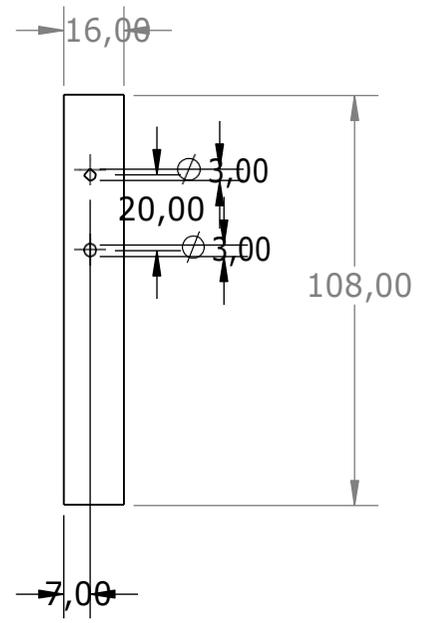
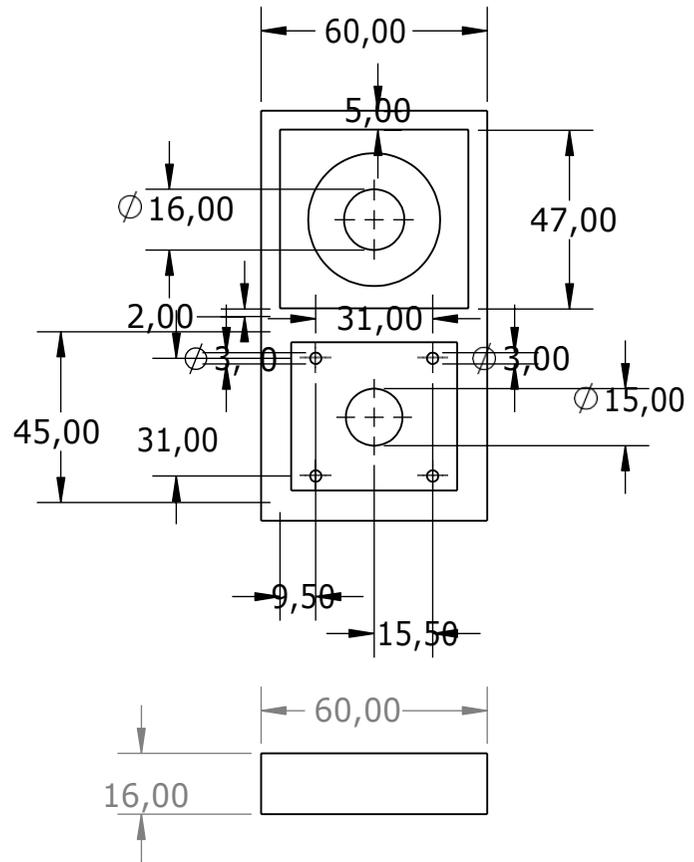
A

D

C

B

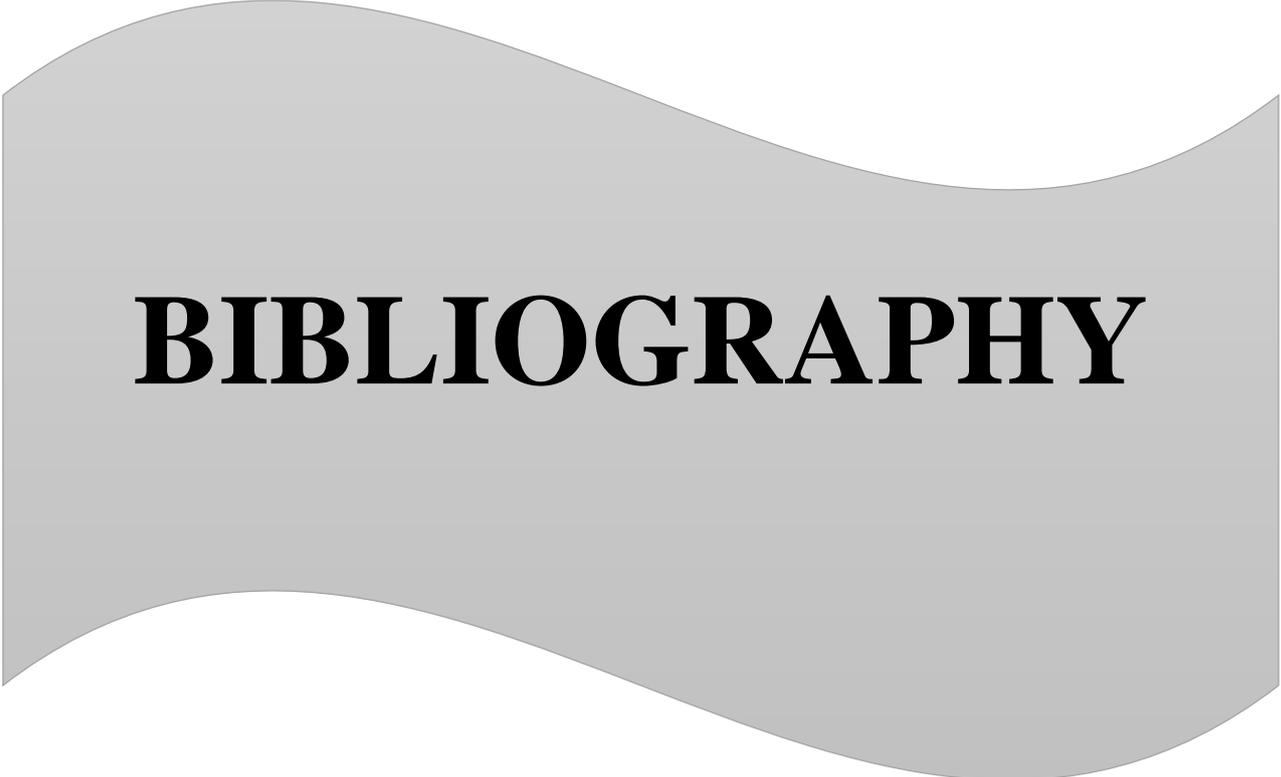
A



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE	
VERIF.					
APPR.					
FAB.					
QUAL.				MATERIAU:	
				MASSE:	

NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
TITRE: support pour les deux axe A et B			
No. DE PLAN			A4
ECHELLE: 1:2		FEUILLE 1 SUR 1	

6 5 4 3 2 1



BIBLIOGRAPHY

Bibliographie

Références Web :

- 1 - CNC Yangsen - "*Machines CNC à 5 axes*". Consulté le 22 mars 2024, sur cncyangsen.com.
- 2 - ProleanTech - "*Usinage CNC et Solutions de Fabrication*". Consulté le 13 mars 2024, sur proleantech.com.
- 3 - SYIL France - "*Machines CNC Compactes*". Consulté le 03 Avril 2024, sur fr.syil.com.
- 4 - DirectIndustry - "*Catalogue de Machines-Outils CNC*". Consulté le 22 Avril 2024, sur directindustry.fr.
- 5 - TechniShop - "*Machines CNC et Logiciels*". Consulté le 22 Avril 2024, sur technishop.fr.
- 6 - MachineTool World - "*Guide des Machines CNC*". Consulté le 12 Mars 2024, sur machinetoolworld.com.
- 7 - Metier Tech - "*Solutions CNC pour l'Industrie*". Consulté le 22 Janvier 2024, sur metiertech.com.
- 8 - PDJ - "*Machines CNC et Solutions de Fabrication*". Consulté le 29 Janvier 2024, sur pdjinc.com.
- 9 - 5AxisMaker - "*Solutions CNC à 5 axes*". Consulté le 17 Mars 2024, sur 5axismaker.com.

Références de Livres et Articles :

- 10 - Gibbs, T. (2020). "*Advanced CNC Programming Techniques*". New York: McGraw-Hill Education.
- 11 - Smith, J. A. (2019). "*Design and Analysis of Machine Tools*". London: Springer.
- 12 - Michaud, L., & Deschamps, F. (2021). "*Conception Assistée par Ordinateur pour les Machines-Outils*". Paris: Dunod.
- 13 - Brown, D. C. (2022). "*Mechanical Engineering Design*". 11th ed. Boston: Pearson.
- 14 - Liu, Y., & Wang, H. (2023). "*Material Processing and Manufacturing*". Beijing: Tsinghua University Press.

Bibliographie

- 15 - Marczewski, K. (2018). *"Technologie des Machines CNC"*. 4ème édition. Varsovie: PWN.
- 16 - Gupta, S. (2020). *"High-Speed Machining and Advanced Cutting Tools"*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- 17 - Johnson, P. (2017). *"Composites Machining for Aerospace Applications"*. Los Angeles: SAE International.
- 18 - Peterson, M. E. (2021). *"Computer Numerical Control in Modern Manufacturing"*. Chicago: Wiley.
- 19 - Chevalier, Jean (1999). *Guide du dessinateur industriel*. Paris : Hachette Technique, 320 pages.